

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

Diseño, construcción y validación de un montaje experimental de elaboración de cerveza artesanal con fines docentes

Curso 2018/2019

**Alumno/a:**

Lucía García Abad

**Director/es:**

Juan José Gallardo Rodríguez  
Lorenzo López Rosales



# Diseño, construcción y validación de un montaje experimental de elaboración de cerveza artesanal con fines docentes

---



---

TRABAJO FIN DE GRADO  
Grado en Ingeniería Química Industrial  
Universidad de Almería

Autora:  
Lucía García Abad

Directores:  
Juan José Gallardo Rodríguez  
Lorenzo López Rosales

Septiembre de 2019



*A mis padres,  
los pilares incansables que lo sostienen  
todo.*

*A mi hermano,  
mi maestro de tantas cosas.*





# ÍNDICE

RESUMEN.....	11
ABSTRACT .....	12
<b>I. MEMORIA.....</b>	<b>13</b>
CAPÍTULO 1: INTERÉS.....	15
CAPÍTULO 2: OBJETO .....	17
2.1. Importancia de las sesiones prácticas en la formación .....	17
2.2. Elaboración de cerveza artesanal.....	18
2.2.1. Materias primas .....	18
2.2.1.1. Agua.....	18
2.2.1.2. Cebada/ Malta .....	19
2.2.1.3. Levadura .....	20
2.2.1.4. Lúpulo .....	21
2.2.2. Proceso de producción. ....	21
2.2.2.1. Maceración.....	22
2.2.2.2. Hervido y lupulizado.....	23
2.2.2.3. Enfriado.....	24
2.2.2.4. Fermentación.....	24
CAPÍTULO 3: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	27
3.1. Dimensionado de los tanques .....	27
3.1.1. Tanque de maceración.....	27
3.1.1.1. Espesor de las paredes .....	29
3.1.1.2. Espesor de filtro de grano .....	31
3.1.1.3. Espesor de la capa aislante.....	32
3.1.2. Tanque de hervido.....	33
3.1.2.1. Espesor de las paredes .....	34
3.1.2.2. Dimensionado de las resistencias eléctricas para calefacción .....	34
3.1.2.3. Dimensionado térmico de un serpentín de termostatizado del mosto de macerado	35
3.1.2.4. Dimensionado de la bomba de impulsión del mosto a través del serpentín de termostatizado. ....	39
3.1.2.5. Dimensionado agitador en el hervidor .....	41
3.1.3. Tanque de fermentación .....	42
3.1.3.1. Espesor de las paredes .....	43
3.2. Dimensionado del intercambiador de calor de placas .....	44



---

3.2.1.	Cálculo del número de placas del intercambiador de calor.....	44
3.2.2.	Cálculo de la caída de presión a través del intercambiador de calor.....	50
3.3.	Instrumentación y control.....	50
<b>CAPÍTULO 4: PROTOCOLOS DE SEGUIMIENTO DE PRODUCCIÓN.....</b>		<b>53</b>
4.1.	pH del agua.....	53
4.2.	Análisis del almidón durante el macerado.....	53
4.3.	Análisis de la maltosa durante el macerado.....	54
4.4.	Análisis de sólidos solubles durante el macerado .....	54
4.5.	Grado de alcohol.....	55
4.6.	Amargor (Grados IBUs) .....	56
4.7.	Color .....	57
<b>CAPÍTULO 5: HIGIENIZACIÓN Y LIMPIEZA DE LOS EQUIPOS .....</b>		<b>59</b>
<b>CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>		<b>61</b>
6.1.	Comprobaciones del equipo .....	61
6.1.1.	Calentamiento de agua en el hervidor .....	61
6.1.2.	Aislamiento térmico del macerador .....	62
6.1.3.	Calentamiento del agua de maceración para el control térmico del proceso .....	62
6.1.4.	Verificación de la capacidad de enfriado del cambiador de placas.....	64
6.2.	Elaboración de un lote de 30 litros .....	65
6.2.1.	Evolución del contenido de almidón durante la maceración.....	66
6.2.2.	Evolución del contenido de maltosa durante la maceración .....	67
6.2.3.	Evolución de la concentración de sólidos solubles durante la maceración.....	69
6.2.4.	Evolución del amargor durante el hervido .....	70
6.2.5.	Evolución del color durante el hervido .....	70
6.2.6.	Evolución del contenido de alcohol durante la fermentación .....	71
6.3.	Conclusiones.....	72
<b>CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>73</b>
<b>II. FASES DE REALIZACIÓN Y CRONOGRAMA.....</b>		<b>75</b>
<b>III. PLANOS .....</b>		<b>79</b>
<b>IV. MEDICIONES Y PRESUPUESTOS .....</b>		<b>84</b>

---



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del interés en cerveza artesanal a través de las búsquedas en Google. ...	16
Figura 2. Tipos de cebada utilizados en cervecería.....	19
Figura 3. Degradación del almidón por acción de las amilasas. ....	20
Figura 4. Micrografía electrónica de barrido de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....	20
Figura 5. Flor de <i>Humulus lupulus</i> . ....	21
Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de producción de cerveza artesana. ....	22
Figura 7. Producción de azúcares fermentables a partir de almidón.....	23
Figura 8. Características que aporta el lúpulo al mosto en función del tiempo de hervido. ....	24
Figura 9. Irish Moss. ....	24
Figura 10. Evolución de la población de levadura durante el proceso de fermentación.....	25
Figura 11. Esquema del tanque de maceración. ....	28
Figura 12. Tabla de valores de la constante K para el cálculo del espesor en la sección elíptica [6]. ....	30
Figura 13. Barril de cerveza de acero inoxidable tipo EURO.....	31
Figura 14. Difusor para la aspersion de agua. ....	31
Figura 15. Plancha perforada para el filtro del macerador. ....	32
Figura 16. Esquema del esfuerzo a soportar por una plancha circular con dos puntos de apoyo. ....	32
Figura 17. Disposición de capas del tanque de maceración. ....	33
Figura 18. Secuencia de cálculo para el área de serpentín y el número de vueltas.....	38
Figura 19. Serpentín circular. ....	39
Figura 20. Gráfica de $Np$ vs. $Re$ .....	41
Figura 21. Esquema del tanque de fermentación. ....	42
Figura 22. Esquema de un intercambiador de calor de placas. ....	44
Figura 23. Parámetros de una placa tipo chevron. ....	44
Figura 24. Factor de corrección de $T_{ml}$ a partir del NUT para un intercambiador de calor de placas. ....	47
Figura 25. Diagrama para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor y el número de placas del intercambiador de calor de placas. ....	49
Figura 26. Sonda de temperatura tipo PT100 de acero inoxidable. ....	51
Figura 27. Relé de estado sólido. ....	51
Figura 28. Tarjera de adquisición y control de datos LabJack U12. ....	51
Figura 29. Interfaz gráfica para el control de temperaturas. ....	52
Figura 30. Secuencia de control de temperatura en el tanque de hervido.....	52
Figura 31. Secuencia de control de temperatura en el tanque de maceración.....	52
Figura 32. Esquema de operación para análisis de almidón. ....	54
Figura 33. Esquema de operación de análisis de azúcares fermentables. ....	54
Figura 34. Medida de sólidos solubles a través de refractometría. ....	55
Figura 35. Equivalencia del color de la cerveza con EBC. ....	57
Figura 36. Diagrama de Sinner. ....	59
Figura 37. Gráfico de la evolución de la temperatura en el tanque de hervido en función del tiempo de calentamiento.....	61



---

Figura 38. Ensayo de efectividad de aislamiento térmico en el macerador. ....	62
Figura 39. Temperaturas óptimas de conversión de cada enzima. ....	63
Figura 40. Gráfico de diferencias en el salto térmico en función de la agitación. ....	64
Figura 41. Evolución de temperaturas para el ensayo del controlador. ....	64
Figura 42. Gráfico de la recta patrón del almidón. ....	67
Figura 43. Evolución del contenido de almidón durante el macerado. ....	67
Figura 44. Gráfico de la recta patrón de la maltosa. ....	68
Figura 45. Evolución del contenido de maltosa durante la maceración. ....	69
Figura 46. Gráfico de la concentración de SS en función del tiempo de hervido. ....	69
Figura 47. Gráfico de la evolución del amargor en función del tiempo de hervido. ....	70
Figura 48. Gráfico de la evolución del color en función del tiempo de hervido. ....	70
Figura 49. Evolución del contenido de alcohol durante el tiempo de fermentación. ....	71
Figura 50. Aspecto del mosto durante la etapa de fermentación. ....	72
Figura 51. Diagrama de Gantt de la distribución de tiempos del trabajo realizado. ....	78



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad de iones (ppm) disueltos en agua de diferentes ciudades. ....	18
Tabla 2. Volumen del macerador en función de la receta utilizada. ....	28
Tabla 3. Dimensiones del tanque de maceración. ....	29
Tabla 4. Elección de la presión de diseño del macerador. ....	30
Tabla 5. Relación del espesor de diseño de las paredes del macerador. ....	30
Tabla 6. Dimensiones del tanque de hervido. ....	34
Tabla 7. Elección de la presión de diseño del tanque de hervido. ....	34
Tabla 8. Relación de espesor de diseño de las paredes del hervidor. ....	34
Tabla 9. Especificaciones térmicas y dimensionales teóricas del serpentín. ....	38
Tabla 10. Características dimensionales del serpentín circular. ....	39
Tabla 11. Cálculo de la constante de pérdida de carga (K) en una curva de 90°. ....	40
Tabla 12. Características del agitador. ....	42
Tabla 13. Dimensiones del tanque de fermentación. ....	43
Tabla 14. Elección de la presión de diseño del fermentador. ....	43
Tabla 15. Relación de espesor de diseño de las paredes del fermentador. ....	43
Tabla 16. Parámetros de las placas del intercambiador de calor. ....	45
Tabla 17. Detergentes recomendados en función del tipo de suciedad. ....	60
Tabla 18. Aplicación del detergente en función de la superficie. ....	60
Tabla 19. Valores de la recta patrón de almidón. ....	66
Tabla 20. Valores de la recta patrón de maltosa. ....	68
Tabla 21. Tabla de mediciones del equipo de fermentación alcohólica diseñado. ....	86





---

## RESUMEN

Este trabajo consistió en el diseño, construcción, instalación y puesta a punto de un equipo de elaboración de cerveza **con fines didácticos**. El principal objetivo perseguido con este dispositivo es dotar al departamento de Ingeniería Química de un equipo de escala adecuada en el que se puedan realizar prácticas de fermentación alcohólica de forma fácil, eficaz y visual.

El tamaño máximo del lote productivo es de unos 50 L. El dispositivo está provisto de un sistema SCADA que permite controlar y registrar variables como la temperatura, llenado de tanques y de agitación. En el trabajo presentado se detallan los cálculos de **dimensionado** de todos los equipos que integran el dispositivo, así como los **protocolos** que se proponen para la elaboración de la práctica de “Producción de cerveza”.

Finalmente, para evaluar el desempeño del dispositivo y los protocolos propuestos se realizó la práctica que se propone en la memoria de este TFG.

**Palabras clave:** Cerveza, fermentación, diseño equipos.



## ABSTRACT

This project consisted of the design, installation and commissioning of a beer brewing system for educational purposes.

The main objective pursued with the construction of this device is to provide the Chemical Engineering Department with a suitable scale equipment in which alcoholic fermentation practices can be carried out easily, efficiently and visually.

The maximum size of the production lot is about 50 litres. The device is provided with a SCADA system that allows controlling and recording variables such as temperature, tank filling and agitation.

In the project presented, the dimensioning calculations of all the equipment that make up the device are detailed, as well as the protocols that are proposed for the elaboration of the “Beer production” practice.

Finally, to evaluate the performance of the device and the proposed protocols, the practice proposed in the memory of this project was carried out.

**Key words:** Beer, fermentation, equipment design.

# I. MEMORIA







# CAPÍTULO 1: INTERÉS

El departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Almería desarrolla una importante labor de divulgación de información con el objetivo de dar a conocer grados en ingeniería, biotecnología y distintos másteres.

Como alumna del grado en Ingeniería Química Industrial y estudiante de bachillerato que fue entusiasmada por la ingeniería química soy consciente de la necesidad de tener prácticas llamativas, eficaces, bien diseñadas y dimensionadas tanto para los alumnos del grado como para aquellos alumnos potenciales que aún están indecisos. El equipo de elaboración de cerveza del que actualmente dispone el departamento está sobredimensionado en cuanto al volumen de producción provocando la dificultad en su manejo y en definitiva da lugar a una práctica tediosa y poco segura. Ante la realidad patente de esta situación y el entusiasmo mío y de mis tutores surge la idea de diseñar un equipo de producción de cerveza con fines educativos en el departamento de Ingeniería Química.

En los últimos años se ha producido un creciente interés por la elaboración de cervezas artesanales debido a la influencia internacional en este tipo de prácticas y a la búsqueda de nuevos productos de calidad por parte del consumidor. Esta moda que empezó como algo lúdico fue creciendo en muchos casos dando lugar a la implantación de microcerveceras. En 2008 existían un total de 21 microcerveceras a nivel nacional mientras que en el año 2015 el número de microcerveceras ascendió hasta 361, lo que supone un aumento del 1600 %.



Figura 1. Evolución del interés en cerveza artesana a través de las búsquedas en Google.

En el mercado actual existen equipos para elaboración de cerveza a pequeña escala los cuales en su inmensa mayoría han sido diseñados y fabricados en base a la experiencia de sus ideólogos y no con diseño de ingeniería. De igual forma no es tarea fácil encontrar un manual pormenorizado en el que se muestren protocolos de medida y seguimiento del proceso de elaboración de cerveza, que asegure una producción homogénea y de calidad.

Aplicando los conocimientos adquiridos en las diferentes asignaturas del grado, se pretende el diseño técnico de un equipo escalable de bajo volumen de producción para la fabricación de cerveza e implementar unos protocolos de medida y seguimiento del proceso de elaboración de la misma.



# CAPÍTULO 2: OBJETO

## 2.1. Importancia de las sesiones prácticas en la formación

Es necesario reconocer la importante labor de las actividades prácticas en la formación universitaria ya que es mediante estas sesiones donde se intenta aproximar al alumno a la actividad desarrollada profesionalmente en un futuro. Las sesiones prácticas no solo facilitan la comprensión de conceptos, sino que promueven el desarrollo de habilidades científicas y de investigación [1].

Los alumnos que acceden a grados científicos deben adquirir una formación básica que les permita desarrollar estrategias para resolver problemas reales y la mejor forma de conseguir este objetivo es salir del aula teórica y enfrentarse al problema real mediante sesiones prácticas preparadas.

El trabajo en el laboratorio propicia el trabajo en equipo entre los alumnos, potenciando el intercambio de conocimiento y sinergias en las soluciones que no serían posibles en el trabajo individual [2].

La utilidad formativa de estas actividades prácticas es indiscutible; sin embargo, en muchas ocasiones se convierten en trabajos tediosos que no nos permiten a los alumnos comprender los conocimientos científicos, en los que quizás se basaba la actividad cuando fue ideada por el profesor. Otras veces nos encontramos ante guiones tan cerrados que no nos permite a los alumnos tener oportunidad de análisis y reflexión.

La actividad propuesta en este TFG pretende permitir al estudiante desarrollar habilidades en el manejo de aparatos de medida, de estrategias de investigación tales como el diseño de experimentos o control de variables y habilidades de comunicación mediante la elaboración de informes y conclusiones.



## 2.2. Elaboración de cerveza artesanal

### 2.2.1. Materias primas

Los ingredientes principales en la fabricación de la cerveza son el agua, la malta de cebada, el lúpulo y la levadura. Además, se pueden utilizar algunos cereales adjuntos para otorgar diferentes sabores y texturas, así como cualquier ingrediente que se quiera adicionar con la intención de aportar ciertos matices.

En el siguiente capítulo se van a describir las características de las diferentes materias primas que se utilizan en la fabricación de la cerveza artesana.

#### 2.2.1.1. Agua

El agua es el ingrediente principal de la cerveza, conteniendo alrededor del 90% en su composición [3] por lo que hay que prestar atención a este componente. El agua se trata de un compuesto tan habitual que a menudo se piensa que no tiene ningún efecto en la calidad de la cerveza, pero no es así, ya que el tipo de agua utilizado tiene gran influencia en la calidad de la cerveza. Algunas variedades de cerveza (Pilsen o la Ale) han estado tan vinculadas al agua que sus lugares de producción dependen directamente del lugar donde se encuentra el agua con las características ideales. El agua utilizada en la elaboración de la cerveza tiene que poseer una elevada pureza, ser potable, estar libre de sabores y olores, sin exceso de sales y exenta de materia orgánica.

Antes de existir redes municipales de distribución de agua las cervecerías solían instalarse cerca de ríos, manantiales o lagos. Este hecho hacía que cervezas fabricadas en otras regiones, con la misma tecnología, carecían del sabor original. La Tabla 1 muestra cómo la concentración de iones y minerales del agua puede variar de una zona a otra, determinando así la calidad y característica de ciertas cervezas.

Tabla 1. Cantidad de iones (ppm) disueltos en agua de diferentes ciudades.

Ciudad	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>
Burton (Inglaterra)	0	24	36	801	294	24
Dortmund (Alemania)	180	69	106	260	261	23
Dublín (Irlanda)	319	12	19	54	117	4
Londres (Inglaterra)	156	99	60	77	52	16
Munich (Alemania)	152	10	2	8	75	18
Pilsen (Bélgica)	14	2	5	2	7	2

El contenido en sales del agua [3] tiene un importante papel en el sabor, el aroma y hasta en la definición del estilo de la cerveza. El sulfato de calcio (CaSO<sub>4</sub>) o carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) puede dar a la cerveza un sabor ligeramente astringente o amargo mientras que la presencia de ciertas cantidades de iones calcio (Ca<sup>+2</sup>) y magnesio (Mg<sup>+2</sup>), incrementan la actividad fermentativa de las levaduras. El exceso de ion sodio (Na<sup>+</sup>) puede conferir un sabor salobre.

En la elaboración de las cervezas más ligeras (tipo Pilsen) se utilizan aguas con bajo contenido en calcio (aguas blandas) mientras que, en las cervezas oscuras, en cambio, se pueden elaborar con aguas más duras. Pero son las aguas medianamente duras las preferidas para la elaboración de la cerveza, sobre todo si son ricas en sulfato cálcico, ya que producen un pH más ácido.

El pH por su parte también se trata de un factor importante que influye en la calidad de una cerveza [4]. En el macerado, el proceso enzimático donde el almidón (polisacárido) es degradado hasta azúcares más sencillos (maltosa y maltotriosa) el agua empleada debe poseer un pH adecuado para maximizar dicha conversión. Las amilasas (alfa y beta) que son los biocatalizadores encargados de la degradación del almidón, poseen un pH óptimo de trabajo alrededor de 5,6. Por otra parte, las proteasas (degradan las proteínas) poseen un rango de trabajo óptimo de entre 4,2 y 5,3.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente la mayoría de los cerveceros artesanales establecen un rango óptimo de pH para la maceración de 5,2 a 5,7. Para ajustar el pH se agregan pequeños volúmenes de ácido fosfórico concentrado, aunque el uso de maltas aciduladas (sauermalz o sour malt), un tipo de cebada malteada con pequeñas cantidades de ácido láctico, usualmente 1 o 2 %, son una alternativa al uso de ácido fosfórico. Las maltas aciduladas deben ser empleadas siempre en proporción menor al 10 % con respecto al peso total de granos utilizados en el proceso, de lo contrario, pueden otorgar cierta acritud al producto final.

### 2.2.1.2. Cebada/ Malta

Aunque puede elaborarse cerveza a partir de otros cereales ricos en almidón, la cebada suele ser el cereal por excelencia para los cerveceros de todo el mundo. Existen muchos tipos diferentes de cebada, pero los más comunes en cervecería son los llamados de dos hileras y de seis hileras (Figura 2). Ambos tipos de cebada contienen entre un 60 y 65 % de almidón y un 10% de proteínas.

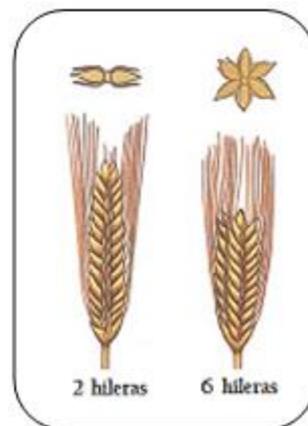


Figura 2. Tipos de cebada utilizados en cervecería.

Algunas cervezas usan granos de cebada sin tratar, pero normalmente la cebada es tostada en diferentes grados o germinada parcialmente para dar lugar a la cebada malteada.

El grano de cebada contiene en su interior diversas sustancias de reserva como lípidos, proteínas y almidón [5] que son metabolizadas por enzimas endógenas una vez se propician las condiciones de germinación (alta humedad y temperatura adecuada) [4]. El proceso de germinación parcial de los granos de cebada se denomina malteado y con él se activa la “maquinaria” enzimática para metabolizar las sustancias de reserva contenidas en el interior de los granos de cebada. Las amilasas se encargan de degradar las largas cadenas de almidones en azúcares más simples (Figura 3) que son fácilmente asimilables. Aquella cebada que se germina y procesa especialmente para obtener la actividad enzimática mencionada recibe el nombre de malta y es uno de los principales ingredientes de la cerveza.

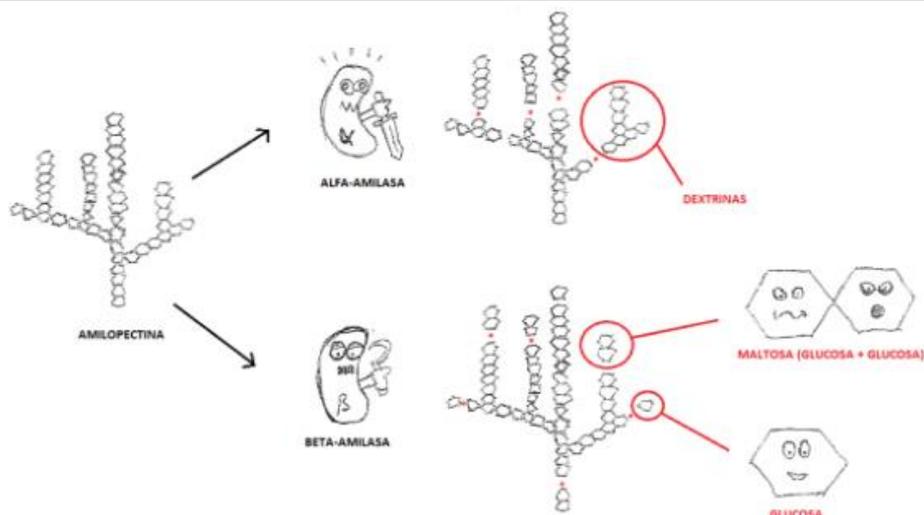


Figura 3. Degradación del almidón por acción de las amilasas.

### 2.2.1.3. Levadura

La levadura encargada de producir el alcohol de la cerveza es *Saccharomyces cerevisiae* (Figura 4), un hongo unicelular microscópico cuyo diámetro varía entre 5 y 10 micras perteneciente al grupo de los ascomicetos (trufas, mohos). *Saccharomyces cerevisiae* es la levadura mayoritariamente utilizada en la fabricación del pan y del vino.



Figura 4. Micrografía electrónica de barrido de *Saccharomyces cerevisiae*.

Las levaduras son microorganismos heterótrofos que suelen metabolizar hidratos de carbono para obtener energía. Estos microorganismos en presencia de oxígeno (aerobiosis) realizan una degradación completa del azúcar (respiración), obteniendo energía, agua y  $\text{CO}_2$ . Cuando la disponibilidad de oxígeno está restringida (anaerobiosis), efectúan una degradación incompleta o fermentación, dando como productos etanol y  $\text{CO}_2$ .

En general, las levaduras son capaces de mostrar actividad en un rango de temperaturas bastante amplio, el cual puede ir de 0 a 50 °C. Sin embargo, su temperatura óptima para la fermentación alcohólica se ubica en el intervalo de 15 a 25 °C. por lo que se les consideran microorganismos mesófilos.

#### 2.2.1.4. Lúpulo

El lúpulo es el ingrediente responsable del amargor y aroma característicos de la cerveza. Tiene además un efecto estabilizador en la espuma, así como cierta acción antibacteriana protectora. Le confiere esa conocida sensación refrescante que caracteriza la cerveza.

El lúpulo utilizado en cervecería es la flor de *Hummulus lupulus* (Figura 5), planta relacionada biológicamente con el género cannabis. Solamente la planta femenina produce las flores que son utilizadas en la fabricación de cerveza.



Figura 5. Flor de *Hummulus lupulus*.

La flor de lúpulo está constituida por celulosa, agua, pectinas, proteínas, monosacáridos y otros. Desde un punto de vista de la elaboración de cerveza existen tres grupos de sustancias de enorme interés: las resinas, los aceites esenciales y los polifenoles. Las resinas están constituidas por alfa-ácidos (humulonas) y beta-ácidos (lupulonas). Los alfa-ácidos son los responsables de la acción antibacteriana y de aportar la mayor cantidad de amargor a la cerveza mientras beta-ácidos aportan una pequeña cantidad de amargor. Los aceites esenciales (constituidos por más de 300 compuestos volátiles) le aportan a la cerveza su carácter aromático. De entre todos el humuleno, el mirceno y el cariofileno, todos ellos terpenos junto con las resinas conforman la denominada *lupulina*. Los polifenoles ejercen una eficaz acción antibacteriana y contribuyen a la precipitación de proteínas durante la cocción del mosto, facilitando así la clarificación.

#### 2.2.2. Proceso de producción.

El proceso de producción de cerveza a partir de cereales malteados puede dividirse en cuatro etapas principales:

1. Maceración: Obtención de azúcar a partir de granos.
2. Hervido: Cocción del líquido sacarino obtenido (mosto).
3. Fermentación.
4. Carbonatación.

En la producción de cerveza, el almidón (polisacárido no fermentable) ha de fragmentarse para convertirse en azúcares más sencillos que sean fermentables.



La Figura 6 muestra de manera esquemática los principales procesos físicos, químicos y biológicos involucrados en la fabricación de una cerveza. A continuación, se analizará brevemente cada una de sus etapas.

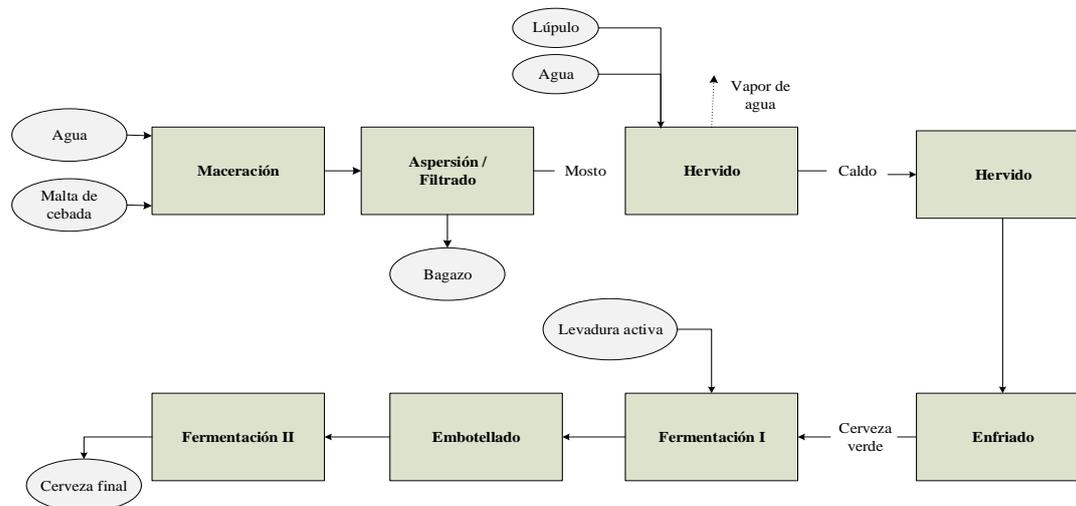


Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de producción de cerveza artesana.

### 2.2.2.1. Maceración

La maceración es el proceso en el que las enzimas contenidas en la malta hidrolizan el almidón dando lugar a azúcares fermentables. Además, en este proceso las proteasas degradan las proteínas aminoácidos y oligopéptidos, lo que le confiere a la cerveza más claridad y una mejor retención de la espuma.

En la esta primera etapa es importante controlar la relación de empaste que hace referencia al volumen de agua (L) puesta en contacto por cada kilogramo de granos durante la maceración. A continuación, se fijan unas condiciones de temperatura adecuadas a la cerveza que se desea elaborar para sacar el mayor provecho a su mezcla y obtener así un mosto rico en materia fermentable.

En las maceraciones con una proporción de kg de malta más elevada, las enzimas están más protegidas de una inactivación térmica demasiado rápida. De esta manera, aumenta la cantidad de azúcares fermentables y con ello la atenuación límite. Pero cabe destacar, que esta influencia de las concentraciones de empaste sobre la degradación del almidón es menor que la influencia de los otros factores. Los valores más habituales de empaste son de 2,5:1 a 3:1. Concentraciones de 2:1 retrasarían el proceso de filtración.

Una vez fijada la relación de empaste, la maceración puede ser realizada de dos maneras diferentes; maceración simple, aplicando solo un rango de temperatura o maceración escalonada, aplicado varios rangos de forma selectiva. Las enzimas son muy sensibles a los cambios de temperatura y de pH. Dependiendo de la temperatura de maceración se favorecerán unas reacciones enzimáticas respecto de otras. Las proteasas poseen un rango de temperatura óptimo de operación de entre 45 y 57 °C. En cuanto a las beta-amilasas (amilasas  $\beta$ ) las cuales degradan las cadenas de almidón secuencialmente desde sus extremos libres hasta los puntos de ramificación, maximizan su velocidad de degradación en el rango de temperatura de 60 y 65 °C. En el proceso se liberan moléculas de maltosa. Las Alfa-amilasas (amilasas  $\alpha$ ) rompen aleatoriamente las cadenas de polisacáridos interiores de la molécula de almidón. No son

productoras de azúcares fermentables, pero contribuyen con la beta-amilasa produciendo nuevos puntos para que ésta ejerza su acción. Posee una temperatura óptima de 67 a 75 °C.

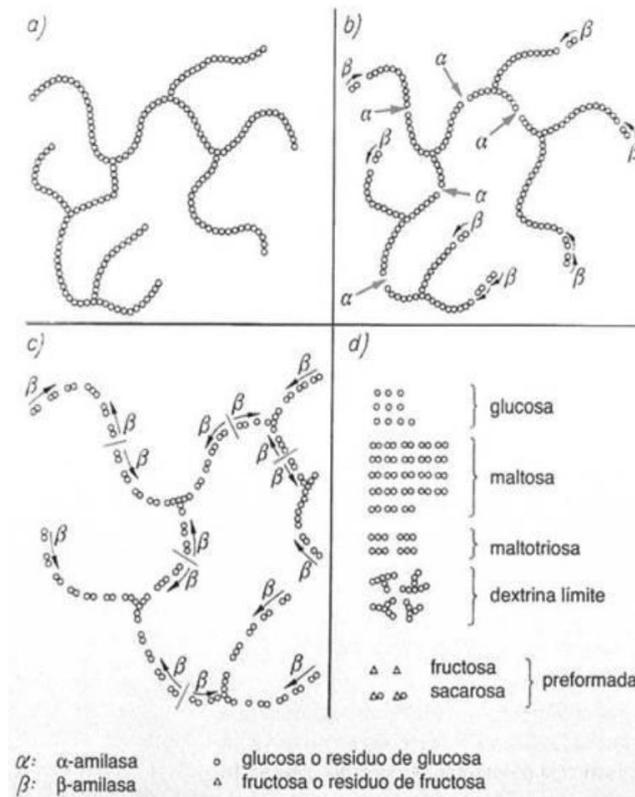


Figura 7. Producción de azúcares fermentables a partir de almidón.

Como se indicó, las reacciones que transcurren durante la maceración se ven afectadas en gran medida por el pH de la mezcla. Las proteasas actúan mejor entre 5,0 y 5,5. Las  $\beta$ -amilasas lo hacen entre 5,2 y 5,8, mientras que las  $\alpha$ -amilasas entre 4,5 y 5,5. Como solución de compromiso en el proceso de maceración suele establecerse un rango promedio de 4,5 a 5,8 para cualquier procedimiento de elaboración artesanal de cervezas. De esta manera se asegura con cierto margen de confianza la correcta actuación de las enzimas señaladas.

Al finalizar el proceso de la maceración, se obtiene una mezcla acuosa de sustancias disueltas y no disueltas. La solución acuosa de los extractos se denomina mosto, mientras que las partes no disueltas se denominan bagazo. Para la fabricación de cerveza se utiliza solamente el mosto, por ello debe ser separado del bagazo mediante filtración, donde se recupera el mosto y el bagazo actúa como material filtrante.

### 2.2.2.2. Hervido y lupulizado.

Durante la etapa de hervido se esteriliza el mosto, se acentúa el color y sobre todo se coagulan las proteínas, lo cual favorece la obtención de una cerveza más transparente. Además, es en esta etapa cuando se adiciona el lúpulo el cual será agregado al inicio de la cocción (aportar amargor) y al final de esta (aportar aroma). Esta es una regla general que será modificada dependiendo de la variedad de lúpulo, estilo de cerveza, etc.

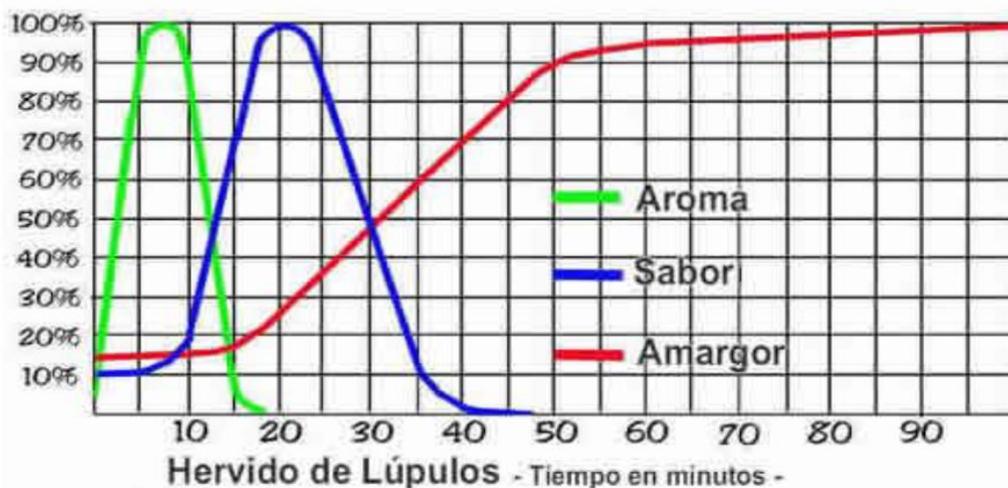


Figura 8. Características que aporta el lúpulo al mosto en función del tiempo de hervido.

Se deja que la mezcla hierva durante 50 minutos, durante los cuales se le adicionarán las dos dosis de lúpulo además de *Irish Moss* (un alga que sirve como clarificante) al finalizar el proceso.



Figura 9. Irish Moss.

### 2.2.2.3. Enfriado

Finalizada la etapa de cocción, el mosto se encuentra a 100 °C por lo que debe enfriarse hasta la temperatura de cultivo de la levadura *S. cerevisiae* (Figura 4) entre 25 y 30 °C. El enfriamiento debe ser rápido para no dar tiempo al desarrollo de microorganismos contaminantes y permitir una mejor coagulación de las proteínas que pueden causar turbidez.

### 2.2.2.4. Fermentación

En la transformación del mosto en cerveza, los azúcares contenidos en el mosto son fermentados, por las enzimas de la levadura, produciéndose energía, etanol y dióxido de carbono. Adicionalmente se generan otros subproductos en la fermentación, que influyen en el sabor, el olor y otras propiedades organolépticas de la cerveza.

Es conveniente oxigenar el mosto antes de inocular *S. cerevisiae* para favorecer de esta manera el metabolismo aeróbico de la levadura y que se produzca crecimiento celular durante las primeras horas de fermentación. Una vez se inocula el fermentador con la levadura, pasan unas horas adaptándose al nuevo medio de cultivo, esta fase se conoce como *fase lag*. Tras estas primeras horas la levadura se ha adaptado y comienza una etapa de rápido crecimiento conocida

como *fase logarítmica o exponencial* y se trata de la sección más importante, en la cual desaparece el sabor a mosto y son establecidos los parámetros cualitativos esenciales de la futura cerveza a través de un metabolismo muy diferenciado de la levadura. Una vez consumido todo el oxígeno contenido en el fermentador se establece una fase de cultivo anaerobio en el que verdaderamente se produce la fermentación. Tan pronto como ha sido consumido por respiración el oxígeno suministrado, la levadura debe restringir nuevamente su administración energética de forma total.

Conforme van desapareciendo los azúcares fermentables contenidos en el mosto la fase logarítmica llega lentamente a su fin. Comienza la *fase estacionaria*, donde la levadura comienza a flocular y el alcohol y el CO<sub>2</sub> contribuyen a una inhibición del crecimiento. Dado que las turbulencias en el tanque durante la intensiva fermentación principal han disminuido o finalizado totalmente, las células de levadura precipitan lentamente hacia el fondo, donde se las puede cosechar.

En este punto la levadura experimenta una deficiencia en el suministro de energía, debiendo ella hacer uso de sus propias reservas.

Aún con la baja temperatura de almacenamiento en frío, la levadura necesita, de forma muy reducida, energía para mantener sus procesos vitales y comienza con la degradación de hidratos de carbono de reserva y otras sustancias excretando cada vez más productos metabólicos. Finalmente, la célula de levadura puede morir (*fase de muerte*). Las enzimas de digestión liberadas comienzan entonces a disolver el interior de la célula, la pared celular es dañada y el contenido celular de la célula en disolución (en autólisis) pasa a la cerveza. De esta manera, son afectados de forma sustancial la espuma y el sabor, se incrementa el valor pH en la cerveza, y las sustancias que entran en solución son medios nutritivos bienvenidos para los contaminantes. Por ello, el maestro cervecero debe encargarse a tiempo y repetidamente de la cosecha de levadura.

Pero también con una cosecha de levadura a tiempo, el cervecero debe continuar ocupándose de la levadura. Ésta debe ser almacenada en frío y de tal manera que pueda desarrollar sus actividades en una nueva fermentación lo antes posible. Es muy importante crear las condiciones óptimas a la levadura para que pueda realizar la fermentación de forma correcta y poder alcanzar resultados también óptimos en la calidad de la cerveza.

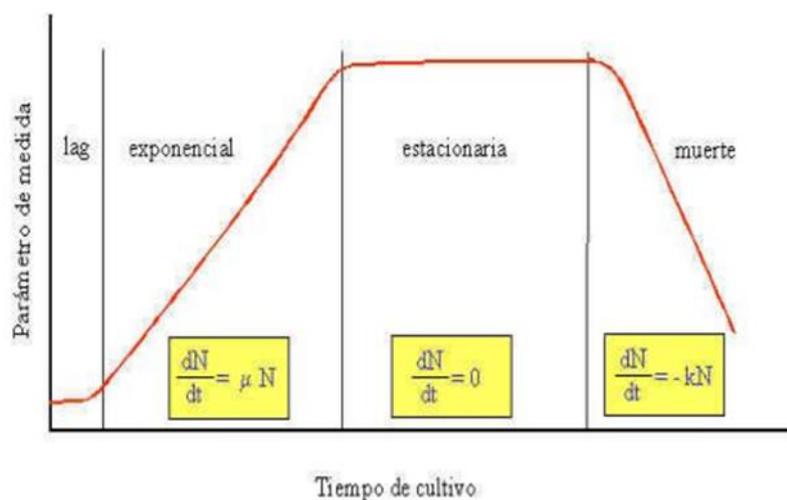


Figura 10. Evolución de la población de levadura durante el proceso de fermentación.



# CAPÍTULO 3: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

## 3.1. Dimensionado de los tanques

El dispositivo diseñado para la fabricación de cerveza estará compuesto principalmente por tres unidades: tanque de maceración, tanque de hervido y fermentador.

Es importante dimensionar cuidadosamente cada una de las unidades atendiendo a criterios mecánicos (espesor de las paredes de los tanques) y criterios térmicos (capa aislante, serpentines, resistencias...) entre otros.

### 3.1.1. *Tanque de maceración*

El primer dispositivo a dimensionar es el tanque de maceración. En este recipiente se pondrán en contacto la cebada malteada con el agua caliente durante el tiempo necesario para reducir el contenido en almidón y aumentar la concentración de azúcares fermentables presentes en el mosto.

En este TFG se plantea la elaboración de lotes de 50 L de cerveza. De igual forma se realizará el dimensionado del equipo para un proceso de maceración simple en el que el mosto se encontrará a una temperatura comprendida entre 65 y 70°C.

Usando la Tabla 2 en la que se presentan las cantidades de malta usadas para la elaboración de distintos tipos de cerveza la cantidad promedio de malta necesaria para elaborar 50 L de cerveza es de 11,5 kg. A partir de estas especificaciones se calcula el volumen del macerador según la Ec. 1.

$$V_{macerador} = R_{empaste} \cdot m_{malta} \cdot \eta \quad Ec. 1$$

Siendo  $V_{macerador}$  el volumen del tanque de maceración expresado en litros,  $R_{empaste}$  el valor de la relación de empaste expresada como litros agua de maceración / kg de malta y  $\eta$  es un factor de sobredimensionado. En base a los datos mostrados en la Tabla 2 se puede observar que un volumen de 50 L para el tanque de maceración basta para elaborar los lotes de 50 L propuestos en este TFG siguiendo distintas recetas y sobredimensionado en un 20% la



capacidad del equipo para evitar problemas. Nótese que el volumen de agua de macerado es menor que el volumen de cerveza a producir -en etapas posteriores más agua será requerida-.

Tabla 2. Volumen del macerador en función de la receta utilizada.

Cerveza	V <sub>lote</sub> (L)	m <sub>malta</sub> (kg)	R <sub>empaste</sub> (L/kg)	$\eta$	V <sub>macerador</sub> (L)
American Pale Ale	50	10,95	3	1,2	39,42
			2,5		32,85
Belgian Saison	50	13,92	3	1,2	50,13
			2,5		41,77
Munich Helles	50	10,60	3	1,2	38,16
			2,5		31,80
Pale Ale Inglesa	50	11,37	3	1,2	40,95
			2,5		34,12
English Indian Pale Ale	50	12,87	3	1,2	46,35
			2,5		38,62
Cream Ale	50	10,07	3	1,2	36,27
			2,5		30,22

El dispositivo se fabricará en acero inoxidable (AISI 304) con un fondo elíptico (Figura 11) para facilitar la precipitación de restos de malta. La altura mínima del fondo elíptico es de 5 cm.

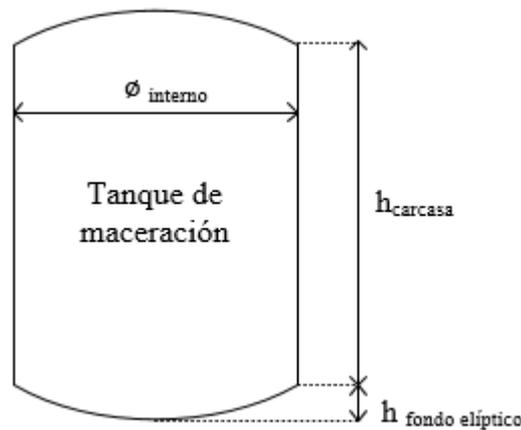


Figura 11. Esquema del tanque de maceración.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se dimensionará el tamaño del tanque haciendo uso de la Ec. 2 y Ec. 3.

$$V_{\text{fondo elíptico}} = \frac{\pi \cdot h_{\text{fondo elíptico}}}{6} \left( \frac{3}{4} \Phi_{\text{interno}}^2 + h_{\text{fondo elíptico}}^2 \right) \quad \text{Ec. 2}$$

$$V_{\text{carcasa}} = \frac{\pi \cdot \Phi_{\text{interno}}^2}{4} h_{\text{carcasa}} \quad \text{Ec. 3}$$

$$V_{\text{total}} = V_{\text{fondo elíptico}} + V_{\text{carcasa}} \quad \text{Ec. 4}$$

Siendo  $V_{\text{fondo elíptico}}$  y  $h_{\text{fondo elíptico}}$  el volumen y la altura del fondo en m<sup>3</sup> y m respectivamente,  $\Phi_{\text{interno}}$  el diámetro interno del depósito expresado en m y  $V_{\text{carcasa}}$  y  $h_{\text{carcasa}}$  el

volumen y la altura de la parte cilíndrica en  $m^3$  y  $m$  respectivamente. En la Tabla 3 se muestra un resumen de los datos dimensionales del tanque de maceración:

Tabla 3. Dimensiones del tanque de maceración.

<b>Altura fondo elíptico (m)</b>	0,05
<b>Diámetro interno (m)</b>	0,377
<b>Altura cilindro (m)</b>	0,4
<b>Volumen fondo elíptico (<math>m^3</math>)</b>	0,0029
<b>Volumen carcasa cilíndrica (<math>m^3</math>)</b>	0,0447
<b>Volumen total tanque (<math>m^3</math>)</b>	0,0048

El volumen total de tanque es superior al volumen mínimo calculado según la Ec. 1, por lo que se puede afirmar que las dimensiones propuestas para el tanque de maceración son correctas.

### 3.1.1.1. Espesor de las paredes

Cualquier tanque o depósito sometido a presión externa o interna debe poseer un espesor mínimo del material usado para la construcción para evitar deformaciones o roturas. Para el cálculo del espesor mínimo que han de tener las paredes del macerador se siguen las normas del código ASME Sección VIII Div. 1. 2004 [6], un código de construcción de recipientes a presión internacional que abarca el diseño, la fabricación y la inspección de recipientes a presión y las pruebas en el taller de fabricación. El código define la presión interna máxima permisible y por consiguiente el espesor mínimo necesario para soportar dicha presión en las diferentes partes del tanque.

Se calculará por separado el espesor mínimo del fondo elíptico y de la carcasa cilíndrica y se seleccionará como el espesor de construcción del depósito aquel que sea mayor.

El primer paso en el dimensionado de la carcasa es el cálculo de la presión de diseño. Se escogerá el mayor valor obtenido entre las presiones calculas por medio de las ecuaciones 5,6 y 7.

$$P_{m\acute{a}x.operaci\acute{o}n} = P_{atm} + P_{columna\ l\acute{i}quido} \quad Ec. 5$$

$$P \geq P_{m\acute{a}x.operaci\acute{o}n} + 1 \quad Ec. 6$$

$$P \geq 1,1 \cdot P_{m\acute{a}x.operaci\acute{o}n} \quad Ec. 7$$

Siendo  $P_{m\acute{a}x.operaci\acute{o}n}$  la presión máxima de operación,  $P_{atm}$  la presión atmosférica y  $P_{columna\ l\acute{i}quido}$  la presión que ejerce el líquido en el interior del tanque. Todas las presiones se expresan en  $kg \cdot cm^{-2}$ . Para calcular la presión de columna de líquido es necesario calcular el área de la sección transversal del recipiente (Ec. 8) y la masa que puede contener (Ec. 9):

$$A = \frac{\pi \cdot \Phi_{interno}^2}{4} \quad Ec. 8$$

$$m = m_{malta} + m_{agua} \quad Ec. 9$$

$$P_{columna\ l\acute{i}quido} = \frac{m}{A} \quad Ec. 10$$

Donde  $A$  es el área de la sección transversal del tanque de maceración medida en  $cm^2$ ,  $m$  es la masa que puede contener el macerador (kg) calculada como la suma de la masa de malta y agua de maceración.



La presión de columna de líquido, siguiendo estos cálculos es de  $0,0483 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

Tabla 4. Elección de la presión de diseño del macerador.

$P_{\text{máx.operación}}(\text{kg}/\text{cm}^2)$	1,085
$P_{\text{máx.operación}}(\text{kg}/\text{cm}^2) + 1$	2,085
$1,1 \cdot P_{\text{máx.operación}}(\text{kg}/\text{cm}^2)$	1,193

La presión de diseño tomada para la realización de los cálculos es  $2,085 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ , la mayor de las presiones mostradas en la Tabla 4. En base a este dato se calcula el espesor mínimo de las distintas partes del tanque, suponiendo que se trata de un recipiente de paredes delgadas, para lo cual se tiene que verificar que  $t/R < 0,07$ .

$$t_{\text{carcasa longitudinal}} = \frac{P \cdot R_{\text{interno}}}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P} + C \quad \text{Ec. 11}$$

$$t_{\text{carcasa tangencial}} = \frac{P \cdot R_{\text{interno}}}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C \quad \text{Ec. 12}$$

$$t_{\text{sección elíptica}} = \frac{P \cdot D \cdot K}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} + C \quad \text{Ec. 13}$$

Donde  $t$  es el espesor de la envolvente,  $R$  y  $D$  son el radio y el diámetro interno respectivamente expresados pulgadas.  $P$  es la presión de diseño, expresada en psi. La tensión máxima admisible del material ( $S$ ) para el acero inoxidable es de 30.000 psi. En los cálculos se toma una eficiencia de soldadura ( $E$ ) de 0,55 y una concesión por corrosión ( $C$ ) de 0 pulgadas.  $K$  es un factor que depende de la proporción  $D/2h$ , cuyo valor está tabulado (Figura 12).

TABLE 1-4.1  
VALUES OF FACTOR  $K$   
(Use Nearest Value of  $D/2h$ , Interpolation Unnecessary)

$D/2h$	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
$K$	1.83	1.73	1.64	1.55	1.46	1.37	1.29	1.21	1.14	1.07	1.00
$D/2h$	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	...
$K$	0.93	0.87	0.81	0.76	0.71	0.66	0.61	0.57	0.53	0.50	...

Figura 12. Tabla de valores de la constante  $K$  para el cálculo del espesor en la sección elíptica [6].

Según las dimensiones especificadas en la Tabla 3, la relación  $D/2h$  es de 3,77, por lo que le corresponde un valor del factor  $K$  de 1,83, según la Figura 12.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los cálculos realizados para el cálculo del espesor de diseño:

Tabla 5. Relación del espesor de diseño de las paredes del macerador.

	$t$ (in)	$t/R$	$t$ calculado (mm)	$t$ normalizado (mm)
Carcasa longitudinal	0,00666	0,00090	0,169	0,5
Carcasa tangencial	0,01335	0,00180	0,339	0,5
Sección elíptica	0,02441	0,00380	0,620	1,5

De acuerdo con este resultado, se verifica que efectivamente se trata de un recipiente de paredes delgadas y el espesor máximo escogido según este método es de 1,5 mm.

Para economizar la construcción del equipo se optó por el acondicionado de barriles de cerveza de acero inoxidable de 50L por la similitud en las dimensiones y debido a que cumple con las especificaciones del espesor de pared ya que estos barriles poseen un espesor de pared de 2 mm.



*Figura 13. Barril de cerveza de acero inoxidable tipo EURO.*

### **3.1.1.2. Espesor de filtro de grano**

En el proceso de macerado como se ha explicado anteriormente se pone en contacto la malta con agua caliente para favorecer la conversión del almidón a azúcares fermentables. Una vez termina este proceso conocido como sacarificación comienza la aspersión que consiste en lavar los granos de malta con agua a 78 °C para maximizar la extracción de los azúcares fermentables. La incorporación del agua de aspersión se realizará por medio de un difusor rectilíneo con múltiples perforaciones (Figura 14).



*Figura 14. Difusor para la aspersión de agua.*

Paralelamente al proceso de aspersión se inicia el proceso de filtrado del mosto para que este sea un líquido lo más claro posible.

Para esta operación de filtrado se aloja en la parte inferior del macerador una plancha circular perforada de acero inoxidable de 2 mm de espesor (Figura 15).



Figura 15. Plancha perforada para el filtro del macerador.

Por medio de la Ec. 14 se ha comprobado que la flexión que provocaría una masa de unos 30 kg (11,5 kg de malta más unos 19,5 kilos de agua) sobre una plancha de 40 cm de diámetro con 2 puntos de soporte (Figura 16) sería de 0,9 mm. En nuestro caso se ha optado por acoplar 6 patas de 5 cm de alto a la plancha distribuyendo de esta manera la carga que soportaría el material y disminuyendo la deflexión de la misma (al reducirse el radio “r” - distancia equivalente entre patas-).

$$DF_{max} = \frac{0,696 \cdot P \cdot r^4}{E \cdot t^3} \quad \text{Ec. 14}$$

Siendo  $DF_{max}$  la deflexión máxima experimentada por la plancha circular (m),  $P$  la presión que soporta la chapa (Pa),  $r$  es el radio de la plancha (m),  $E$  es el módulo de Young del acero (200 GPa) y  $t$  es el espesor de la plancha (m).

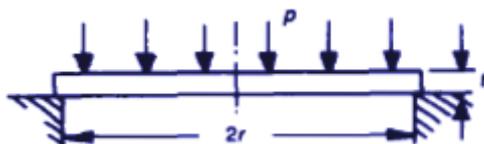


Figura 16. Esquema del esfuerzo a soportar por una plancha circular con dos puntos de apoyo.

### 3.1.1.3. Espesor de la capa aislante

Con el objetivo de minimizar el gasto energético se usará una capa de material aislante que recubra el tanque de maceración.

El aislante empleado es una espuma elastomérica a base de caucho sintético, conocida industrialmente como ARMAFLEX, de 0,01 m de espesor que minimice la pérdida de calor. Según especificaciones del fabricante, su conductividad térmica es de  $0,033 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

El calor intercambiado al medio es por tanto debido al flujo de calor por convección en el interior del tanque, el flujo por conducción a través de la pared de acero inoxidable del tanque, el flujo por conducción a través del aislante, y el flujo por convección del aire que envuelve el tanque.

En los cálculos siguiente se trabaja siempre teniendo en cuenta que la temperatura de la superficie externa de la capa aislante es como máximo de 25 °C para asegurar las condiciones trabajo con el equipo.

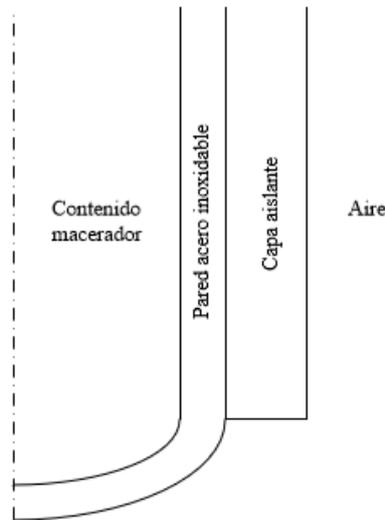


Figura 17. Disposición de capas del tanque de maceración.

$$q = \sum q_{convección} + \sum q_{conducción} \quad \text{Ec. 15}$$

$$q_{convección} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Ec. 16}$$

$$q_{conducción} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{e} \quad \text{Ec. 17}$$

Combinando las expresiones anteriores se obtiene la siguiente ecuación general (Ec. 18) para el caso del tanque de maceración:

$$q = \frac{T_{int} - T_{ext}}{\frac{1}{h_{agua} \cdot A_{int}} + \frac{e_{pared}}{k_{acero\ inox.} \cdot A_{pared}} + \frac{e_{aislante}}{k_{aislante} \cdot A_{aislante}} + \frac{1}{h_{aire} \cdot A_{aislante}}} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde  $q$  es el calor total intercambiado por el sistema,  $q_{convección}$  y  $q_{conducción}$  son el calor transmitido por convección y conducción respectivamente, expresados en W.  $T_{int}$  y  $T_{ext}$  son las temperaturas en el interior del tanque y del medio que lo envuelve respectivamente y medidas en Kelvin.  $h$  es el coeficiente individual de transmisión de calor medido en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ .  $A$  es el área de intercambio de calor medida en  $m^2$ .  $e$  es el espesor de la capa medido en m y  $k$  es la conductividad térmica del material medida en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

Con el aislante empleado se produce una pérdida de calor de 62,12 W mientras que sin él la pérdida asciende a 334 W, lo que significa que se ha reducido la pérdida de calor en un 81,4% en el tanque de maceración.

### 3.1.2. Tanque de hervido

El siguiente proceso en la elaboración de cerveza es el hervido. Una vez finalizado el proceso de maceración se trasvasa todo el contenido líquido a un segundo tanque.

El hervidor es similar al macerador, ya que se trata de un tanque de acero inoxidable de calidad alimentaria con fondo elíptico.



Este dispositivo está dimensionado nuevamente para la elaboración de lotes de 50 litros. La secuencia de cálculo es similar a la expuesta en el punto anterior.

El diámetro interno del tanque se fija en 0,377 m, y la altura del fondo elíptico es de 0,05 m. Aplicando la Ec. 2 y Ec. 3 se determinan las características dimensionales del tanque de hervido, que se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones del tanque de hervido.

<b>Altura fondo elíptico (m)</b>	0,05
<b>Diámetro interno (m)</b>	0,377
<b>Volumen total tanque (m<sup>3</sup>)</b>	0,06
<b>Volumen fondo elíptico (m<sup>3</sup>)</b>	0,0029
<b>Volumen carcasa cilíndrica (m<sup>3</sup>)</b>	0,0571
<b>Altura cilindro (m)</b>	0,52

### 3.1.2.1. Espesor de las paredes

De la misma forma que en el macerador, se calcula el espesor mínimo que han de tener las paredes del tanque de hervido para soportar la presión interna que ejerce el fluido.

Para los cálculos siguientes se toman las características del agua.

Aplicando la Ec. 8, Ec. 9 y Ec. 10 se obtiene una presión de columna de líquido de 0,054 kg·cm<sup>-2</sup>. A partir de este dato, se calcula la presión de diseño, tomándose la máxima de la Tabla 7.

Tabla 7. Elección de la presión de diseño del tanque de hervido.

<b>P<sub>máx.operación</sub>(kg/cm<sup>2</sup>)</b>	1,087
<b>P<sub>máx.operación</sub>(kg/cm<sup>2</sup>) +1</b>	2,087
<b>1,1 · P<sub>máx.operación</sub>(kg/cm<sup>2</sup>)</b>	1,196

La presión de diseño tomada es de 2,087 kg·cm<sup>-2</sup> y en base a este dato se calcula el espesor mínimo de las distintas partes del tanque según la Ec. 11, Ec. 12 y Ec. 13.

Tabla 8. Relación de espesor de diseño de las paredes del hervidor.

	<b>t(in)</b>	<b>t/R</b>	<b>t<sub>calculado</sub>(mm)</b>	<b>t<sub>normalizado</sub>(mm)</b>
<b>Carcasa longitudinal</b>	0,00667	0,00090	0,169	0,5
<b>Carcasa tangencial</b>	0,01336	0,00180	0,339	0,5
<b>Sección elíptica</b>	0,02443	0,00329	0,620	1,5

De acuerdo con este resultado, se verifica que efectivamente se trata de un recipiente de paredes delgadas y el espesor máximo escogido para el hervidor según este método es de 1,5 mm.

### 3.1.2.2. Dimensionado de las resistencias eléctricas para calefacción

El tanque de hervido tiene dos funciones: por un lado, calentar el agua necesaria para el macerado hasta unos 78 °C y una vez acabado el proceso de maceración, calentar el mosto hasta a 100 °C para su hervido.

Para alcanzar las temperaturas necesarias en un tiempo prudencial, se instalarán unas resistencias eléctricas. Como se detalla en la Tabla 6, el tanque de hervido tiene una capacidad de 0,06 m<sup>3</sup>.

A partir de la Ec. 19 se calcula la potencia calefactora necesaria para alcanzar los requerimientos térmicos.

$$W = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_f - T_0)}{t \cdot \varepsilon} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde  $m$  es la masa de mezcla contenida en el tanque de hervido expresada en g,  $C_p$  es el calor específico de la mezcla, que en el caso del agua se corresponde con 4,19 J·g<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>,  $T_f$  es la temperatura final que se pretende alcanzar de 100°C y  $T_0$  es la temperatura de partida que se supone de 20 °C.  $t$  es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar la temperatura final expresado en minutos y se establece en 60 min., y  $\varepsilon$  es la eficiencia del sistema teniendo en cuenta la efectividad de la resistencia y las posibles pérdidas de calor a través de las paredes del tanque. En este caso se supone una eficiencia del 95 %.

Con todos estos datos se obtiene una potencia calefactora de 5875 W, por lo que usarán 4 resistencias de 1500 W para suplir los requerimientos energéticos.

### 3.1.2.3. Dimensionado térmico de un serpentín de termostatzado del mosto de macerado

Con el objeto de tener un control más robusto de la temperatura de maceración, se diseñó un serpentín de acero inoxidable fijado en el interior del hervidor que conecta el macerador con el hervidor.

Para realizar los cálculos se consideró que se desea producir un salto térmico de 11 °C en 5 min de todo el volumen de agua contenido en el macerador que suele ser unos 30 L (considerando 11,5 kg malta y una razón de empaste es 2,5). Por medio de la Ec. 20 se calcula el calor a aportar e igualando esta con la Ec. 21 se puede obtener el área necesaria de serpentín para conseguir el objetivo.

$$Q = V_{maceracion} \cdot \rho_{mosto} \cdot C_{p_{mosto}} \Delta T \quad \text{Ec. 20}$$

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Ec. 21}$$

Para realizar el cálculo del área del serpentín y el número de vueltas necesarias se determinó el coeficiente global de transferencia de energía teniendo en cuenta que se produce transmisión de calor por convección (agua caliente/pared serpentín y pared serpentín/mosto) y conducción (pared del serpentín). La Figura 18 muestra la secuencia de cálculo seguida, así como las ecuaciones empleadas [7].

Por un lado, se calcula el coeficiente de convección del agua caliente que está sometida a agitación a través del agitador tipo hélice que se encuentra inmerso en el tanque de hervido. Para ello se calcula el número de Nusselt (Ec. 22) a partir de los números adimensionales de Reynolds y Prandlt.

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^m \quad \text{Ec. 22}$$



$$Re = \frac{(\Phi_{agitador})^2 \cdot N \cdot \rho_{agua}}{\mu} \quad Ec. 23$$

$$Pr = \frac{Cp_{agua} \cdot \mu}{k_{agua}} \quad Ec. 24$$

$$Nu = \frac{h_{herv.} \cdot \Phi_{herv.}}{k_{agua}} \quad Ec. 25$$

Donde

- $Nu$  es el número adimensional de Nusselt.
- $Re$  es el número de Reynolds.
- $Pr$  es el número adimensional de Prandtl.
- $a$ ,  $b$  y  $m$  son constantes que para un agitador tipo hélice toman el valor de 0,54, 0,67 y 0,14 respectivamente.
- $\mu$  y  $\mu_w$  es la viscosidad dinámica del fluido en agitación y del agua respectivamente, que en este caso toma un valor de  $0,8 \cdot 10^{-3}$  Pa·s para ambas variables.
- $\Phi_{agitador}$  es el diámetro del agitador que toma un valor de 0,3 m.
- $\Phi_{herv}$  es el diámetro interno del tanque de hervido que toma un valor de 0,5 m.
- $N$  es la frecuencia de agitación que toma un valor de  $0,5 \text{ rev} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- $\rho_{agua}$  es la densidad del agua que toma un valor de  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- $C_p$  es el calor específico, que en el caso del agua toma el valor de  $4,2 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ .
- $k$  es el coeficiente de conductividad térmica que en el caso del agua toma un valor de  $0,59 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ .
- $h_{herv}$  es el coeficiente de convección en el interior del tanque de hervido, expresado en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Por otro lado, se realiza el balance de energía en el interior del serpentín utilizando las ecuaciones expuestas a continuación.

$$Nu = 0,085 \cdot Re^{0,74} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left( \frac{\Phi_{tubo}}{\Phi_{serpentín}} \right)^{0,1} \quad Ec. 26$$

$$Re = \frac{\frac{V_{mosto}}{t_{calentamiento}} \cdot A_{tubo} \cdot \Phi_{tubo} \cdot \rho_{mosto}}{\mu_{mosto}} \quad Ec. 27$$

$$Pr = \frac{Cp_{mosto} \cdot \mu_{mosto}}{k_{mosto}} \quad Ec. 28$$

$$\mu_{mosto} = \mu_w \cdot (1 + 2,5 \cdot \Phi_{malta} + 14,1 \cdot \Phi_{malta}^2) \quad Ec. 29$$

$$k_{mosto} = (326,8 + 1,0412T - 0,00337T^2) \cdot \left[ 0,44 + 0,54 \left( \frac{V_{mosto} \cdot \rho_w}{m_{malta} + V_{mosto} \cdot \rho_w} \right) \right] \cdot 1,73 \cdot 10^{-3} \quad Ec. 30$$

$$Nu = \frac{h_1 \cdot \Phi_{tubo}}{k_{mosto}} \quad Ec. 31$$

$$h_{serpentín} = h_1 \cdot \left( 1 + 3,54 \cdot \frac{\Phi_{tubo}}{\Phi_{serpentín}} \right) \quad Ec. 32$$

Donde

- $Nu$  es el número adimensional de Nusselt.
- $Re$  es el número de Reynolds.
- $Pr$  es el número adimensional de Prandtl.



- $\Phi_{tubo}$  es el diámetro del tubo que forma el serpentín que toma un valor de 0,01m.
- $\Phi_{serpentín}$  es el diámetro del serpentín circular que toma un valor de 0,32 m.
- $V_{mosto}$  es el volumen de mosto que hay en el macerador, que en este caso se trata de  $0,03 \text{ m}^3$ .
- $t_{calentamiento}$  es el tiempo esperado para estabilizar la temperatura que se establece en 5 min.
- $A_{tubo}$  es la superficie de las paredes del serpentín, expresada en  $\text{m}^2$ .
- $\rho_{mosto}$  es la densidad del mosto que toma un valor de  $1060 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- $\mu_{mosto}$  es la viscosidad dinámica del mosto que pasa por el interior del serpentín que se calcula según la Ec. 29.
- $k_{mosto}$  es el coeficiente de conductividad térmica del mosto que se calcula según la Ec. 30.
- $\Phi_{malta}$  es el diámetro de grano de la malta que toma un valor de 0,015m.
- $T$  es la temperatura mayor del proceso de calentado, que se trata de  $67 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- $h_1$  y  $h_{serpentín}$  son el coeficiente de convección en el interior del serpentín teórico y corregido respectivamente, expresado en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Una vez calculados los coeficientes de convección del intercambio descrito, es posible calcular el coeficiente global de transferencia de calor utilizando la Ec. 33 y el área del serpentín a partir de la Ec. 21.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{herv}} + \frac{e_{tubo}}{k_{acero}} + \frac{1}{h_{serpentín}}} \quad \text{Ec. 33}$$

Sabiendo el área del serpentín es posible calcular el número de vueltas teniendo en cuenta las dimensiones estructurales del mismo a partir de la Ec. 34.

$$A = \left(2\pi \frac{\Phi_{tubo}}{2}\right) \cdot n_{vueltas} \cdot \left(2\pi \frac{\Phi_{serpentín}}{2}\right) \quad \text{Ec. 34}$$

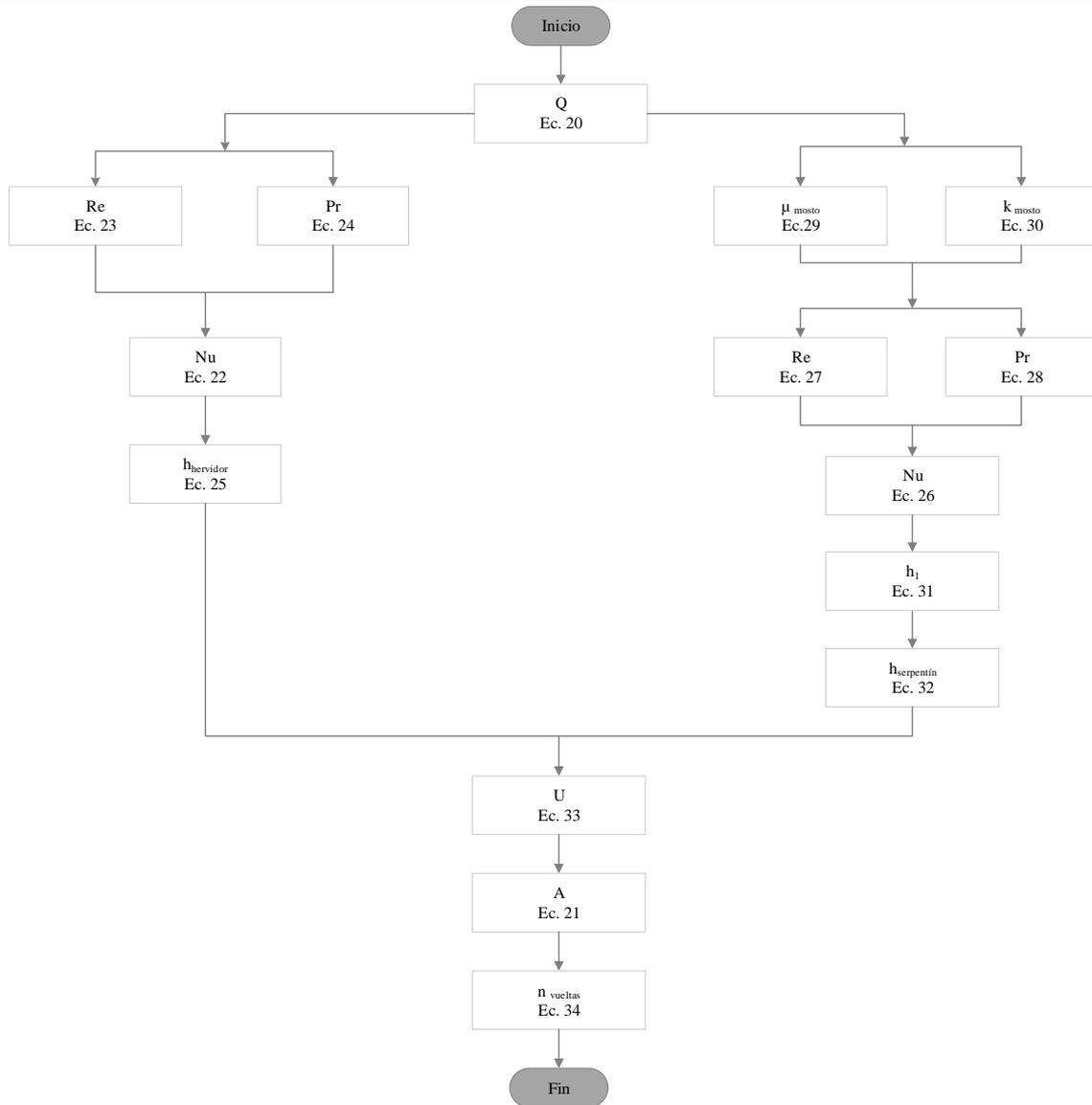


Figura 18. Secuencia de cálculo para el área de serpentín y el número de vueltas.

Siguiendo la secuencia de cálculos anteriormente expuesta, el serpentín debe cumplir las especificaciones detalladas en la Tabla 9:

Tabla 9. Especificaciones térmicas y dimensionales teóricas del serpentín.

<b>Calor intercambiado, Q (kJ)</b>	1.207
<b>Coefficiente global de transferencia de calor, U (Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>)</b>	893,195
<b>Área de contacto (m<sup>2</sup>)</b>	0,409
<b>Número de vueltas del serpentín</b>	14,4

El serpentín del que se dispone tiene un total de 17 vueltas por lo que al ser mayor que las vueltas mostradas en la Tabla 9 cumple con las especificaciones teóricas.

### 3.1.2.4. Dimensionado de la bomba de impulsión del mosto a través del serpentín de termostatzado.

Para el dimensionado de la bomba necesaria para hacer pasar el agua a través del serpentín, que mantiene el contenido del macerador a 67 °C, es necesario calcular la pérdida de carga existente en el mismo [8].

Durante el paso del fluido por la tubería que forma el serpentín, se producen pérdidas de energía debido a la curvatura y la longitud.

El caudal que pasa por el interior del serpentín es de 5,75 L·min<sup>-1</sup>.



Figura 19. Serpentín circular.

Las características dimensionales del serpentín construido en acero AISI 304–L se detallan en la Tabla 10:

Tabla 10. Características dimensionales del serpentín circular.

<b>Diámetro interno del tubo (m)</b>	0,012
<b>Espesor pared (mm)</b>	0,5
<b>Diámetro de la espiral (m)</b>	0,24
<b>Longitud total del serpentín (m)</b>	14,5
<b>Número de espirales</b>	17

Se trata de un serpentín circular, por lo que se puede considerar que cada vuelta contiene cuatro curvas de 90°; así el número de curvas que contiene todo el serpentín es de 68.

Para empezar, se calcula el área de la sección de paso del fluido a partir de la Ec. 35:

$$A = \frac{\pi \cdot \varnothing}{4} \quad \text{Ec. 35}$$

donde A es el área de la sección de paso en m<sup>2</sup> y  $\varnothing$  es el diámetro interno del tubo en m.

A partir del área se calcula la velocidad del fluido (Ec. 36) por el interior del tubo:

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 36}$$

Donde  $v$  es la velocidad del fluido en m/s y  $Q$  es el caudal que entra en el serpentín en m<sup>3</sup>/s.



Se calcula el Reynolds a partir de la velocidad (Ec. 37):

$$Re = \frac{\varnothing \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Ec. 37}$$

Donde  $Re$  es el Reynolds del flujo,  $\rho$  es la densidad del mosto que toma un valor de  $1060 \text{ kg/m}^3$  y  $\mu$  es la viscosidad dinámica del mosto que toma un valor de  $1,041 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Aplicando la Ec. 37 se obtiene un valor de Reynolds de 10353,8 por lo que se puede afirmar que el fluido se encuentra en régimen turbulento al ser superior a 4000.

Se calcula el factor de fricción mediante la ecuación de Haaland (Ec. 38).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \cdot \log \left[ \left( \frac{\varepsilon/\varnothing}{3,7} \right)^{1,1} + \frac{6,9}{Re} \right] \quad \text{Ec. 38}$$

Donde  $f$  es el factor de fricción y  $\varepsilon$  es la rugosidad del acero que toma un valor de  $9 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ .

La constante de pérdida de carga en cada curva de  $90^\circ$  depende de la relación entre el radio de la espiral ( $r$ ) y el diámetro interno de la tubería ( $\varnothing$ ) y se detalla en la Tabla 11.

Tabla 11. Cálculo de la constante de pérdida de carga ( $K$ ) en una curva de  $90^\circ$ .

$r/\varnothing$	$K_{curva}$
1	$20f$
1,5	$14f$
2	$12f$
3	$12f$
4	$14f$
6	$17f$
8	$24f$
10	$30f$
12	$34f$
14	$38f$
16	$42f$
20	$50f$

En este caso, la relación  $r/\varnothing$  es de 10, por lo que la constante en cada curva es 30 veces el factor de fricción. Con este dato es posible calcular la constante en todo el serpentín aplicando la Ec. 39.

$$K_{serpentín} = (n - 1) \left( 0,25\pi f \frac{r}{\varnothing} + 0,5K_{curva} \right) + K_{curva} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde  $K_{serpentín}$  es la constante de pérdida de carga en todo el serpentín,  $n$  es el número total de curvas de  $90^\circ$  que hay en el serpentín,  $r$  es el radio de la espiral expresado en m,  $\varnothing$  es el diámetro interno del tubo en m y  $K_{curva}$  es la constante de pérdida de carga de cada curva.

Conociendo la velocidad de circulación del fluido calculada según la Ec. 36 y la constante de pérdida de carga del serpentín calculada según la Ec. 39, es posible determinar la pérdida de carga en el dispositivo según la Ec. 40:

$$w_f = K_{serpentín} \frac{v^2}{2} \tag{Ec. 40}$$

Aplicando la Ec. 40, se obtiene una pérdida de carga en el serpentín de 22.787 Pa, o lo que es lo mismo 2,33 mca.

### 3.1.2.5. Dimensionado agitador en el hervidor

El consumo de potencia se relaciona con la densidad del fluido, su viscosidad, la velocidad de rotación y el diámetro del impulsor, por medio de gráficas de número de potencia en función del número de Reynolds.

$$Re = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \tag{Ec. 41}$$

$$N_p = \frac{P}{D_a^5 \cdot N^3 \cdot \rho} \tag{Ec. 42}$$

Donde

- $Re$  es el número de Reynolds (adimensional)
- $N_p$  es el número de potencia (adimensional)
- $D_a$  es el diámetro del agitador en (m)
- $N$  es la velocidad de agitación en (revoluciones/segundo)
- $\mu$  es la viscosidad del fluido en (Pa·s)
- $\rho$  es la densidad del fluido en (kg·m<sup>-3</sup>)
- $P$  es la potencia en (W)

Para el cálculo del número de potencia se debe utilizar la siguiente tabla en la que se grafica el número de potencia en función del número de Reynolds para distintos tipos de agitadores:

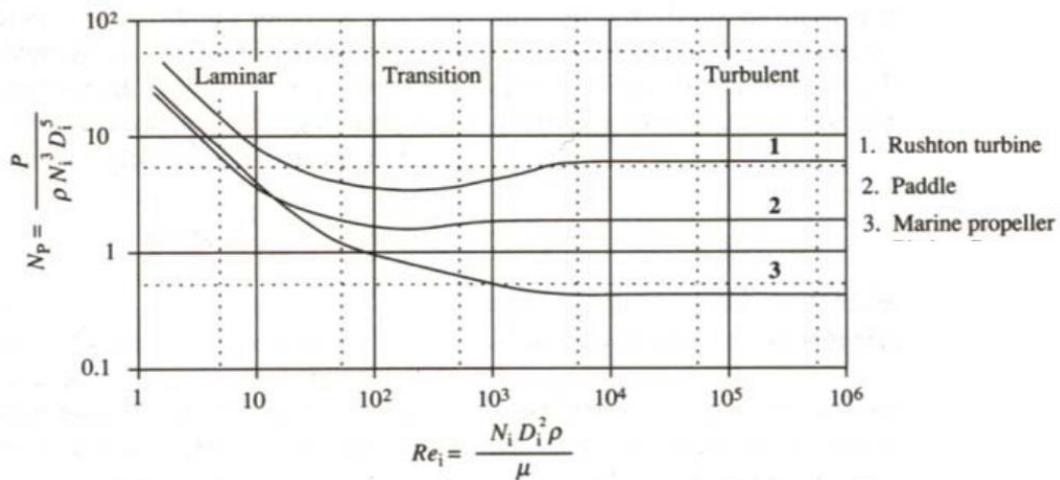


Figura 20. Gráfica de  $N_p$  vs.  $Re$



Este consumo de potencia es el proporcionado al fluido y no incluye la potencia que se usa en las cajas de engranajes. Las eficiencias típicas de los motores eléctricos son: 75% para motores de 0,5 kW, 80% para 2 kW, 84% para 5 kW, 87% para 15 kW y aproximadamente 93% para motores de más de 150 kW. Como una aproximación, la pérdida de potencia en las cajas de engranajes y en la ineficiencia del motor eléctrico es de entre el 30 y el 40% de P, la entrada de potencia real en el fluido.

$$P_{motor} = 1,4 \cdot P$$

Ec. 43

Donde:

- $P_{motor}$  es la potencia necesaria del motor en (W)
- P es la potencia calculada según la Ec. 42 en (W)

La velocidad de agitación es de 60 rpm con lo que se obtiene:

Tabla 12. Características del agitador.

N	80 rpm
Re	$4,32 \cdot 10^4$
$N_p$	2
P	0,49 W
$P_{motor}$	0,69 W

### 3.1.3. Tanque de fermentación

Finalmente se transvasa el mosto lupulizado “cerveza verde” para iniciar el proceso de fermentación.

El fermentador se diseñará con un fondo cónico que permita recuperar la levadura y su posterior reutilización y estará fabricado en polietileno y polipropileno rotomoldeado calidad alimentaria.

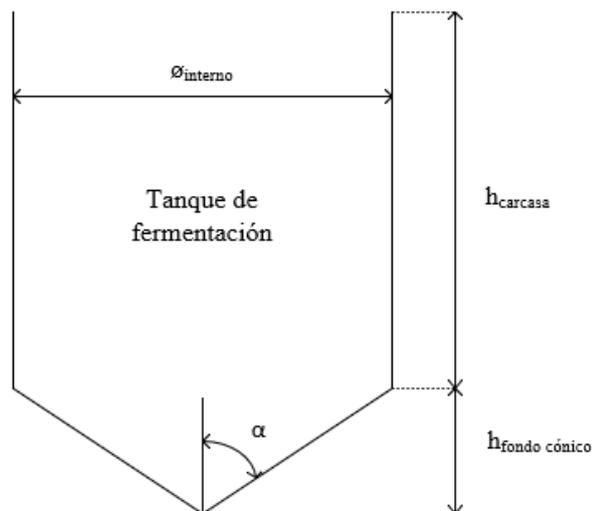


Figura 21. Esquema del tanque de fermentación.

Las características dimensionales del fermentador se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13. Dimensiones del tanque de fermentación.

<b>Diámetro interno (m)</b>	0,38
<b>Altura cilindro (m)</b>	0,78
<b>Volumen carcasa cilíndrica (m<sup>3</sup>)</b>	0,070
<b>Altura cono (m)</b>	0,190

### 3.1.3.1. Espesor de las paredes

De la misma forma que en el macerador, se calcula el espesor mínimo que han de tener las paredes del tanque de fermentación para soportar la presión interna que ejerce el fluido.

Para los cálculos siguientes se toman las características del agua.

Aplicando la Ec. 8, Ec. 9 y Ec. 10 se obtiene una presión de columna de líquido de 0,062 kg·cm<sup>-2</sup>. A partir de este dato, se calcula la presión de diseño, tomándose la máxima de la Tabla 14.

Tabla 14. Elección de la presión de diseño del fermentador.

<b>P<sub>máx.operación</sub>(kg/cm<sup>2</sup>)</b>	1,095
<b>P<sub>máx.operación</sub>(kg/cm<sup>2</sup>) +1</b>	2,095
<b>1,1 · P<sub>máx.operación</sub>(kg/cm<sup>2</sup>)</b>	1,205

La presión de diseño tomada es de 2,095 kg·cm<sup>-2</sup> y en base a este dato se calcula el espesor mínimo de las distintas partes de la carcasa cilíndrica según la Ec. 11 y Ec. 12; y el espesor mínimo para el fondo cónico a partir de la Ec. 44.

$$t_{sección\ cónica} = \frac{P \cdot D}{4 \cdot \cos\alpha(S \cdot E) + 0,4 \cdot P} + C \quad Ec. 44$$

Donde  $t_{sección\ cónica}$  es el espesor de la envolvente expresada en pulgadas,  $\alpha$  es el ángulo del cono con respecto a la vertical y  $S$  es la tensión máxima admisible que en el caso de polietileno toma un valor de 403205 psi.

Tabla 15. Relación de espesor de diseño de las paredes del fermentador.

	<b>t(in)</b>	<b>t/R</b>	<b>t<sub>calculado</sub>(mm)</b>	<b>t<sub>normalizado</sub>(mm)</b>
<b>Carcasa longitudinal</b>	0,00046	0,00007	0,012	0,5
<b>Carcasa tangencial</b>	0,00093	0,00013	0,024	0,5
<b>Sección cónica</b>	0,00107	0,00016	0,027	0,5

De acuerdo con los resultados detallados en la Tabla 15, se verifica que efectivamente se trata de un recipiente de paredes delgadas y el espesor máximo escogido para el fermentador según este método es de 0,5 mm.



### 3.2. Dimensionado del intercambiador de calor de placas

Una vez realizado el proceso de hervido, a 100 °C se pasa el fluido al tanque de fermentación. Para poder realizar la inoculación de la levadura se debe enfriar lo más rápido posible el mosto hasta una temperatura de unos 18 °C. Para enfriarlo se utiliza un intercambiador de placas, cuyas características se especifican a continuación.

#### 3.2.1. Cálculo del número de placas del intercambiador de calor

El objetivo final en este apartado es el cálculo del número de placas a partir de las dimensiones efectivas de una placa.

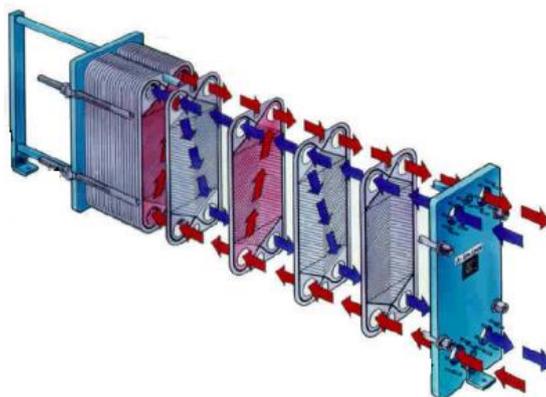


Figura 22. Esquema de un intercambiador de calor de placas.

Para comenzar con el dimensionado [9] se han de tener en cuenta las características de la placa; en este caso en concreto se va a utilizar una placa tipo *chevron* cuyos parámetros se indican en la Figura 23.

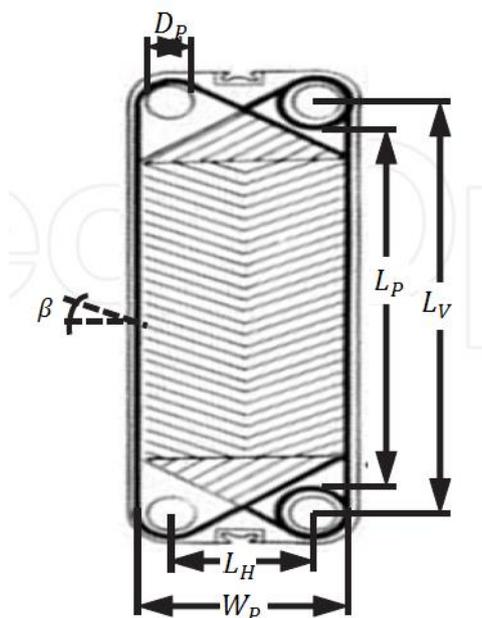


Figura 23. Parámetros de una placa tipo chevron.

El fabricante aporta los datos detallados en la Tabla 16, a partir de los cuales se realizan los cálculos de dimensionado.

Tabla 16. Parámetros de las placas del intercambiador de calor.

<b>Longitud placa <math>L_v</math> (m)</b>	0,15
<b>Anchura placa <math>W_p</math> (m)</b>	0,08
<b>Diámetro del orificio <math>D_p</math> (m)</b>	0,015
<b>Distancia entre placas (m)</b>	0,003
<b>Longitud placa <math>L_v</math> (m)</b>	0,15

$$L_p = L_v - D_p \quad \text{Ec. 45}$$

$$D_e = 2 \cdot b \quad \text{Ec. 46}$$

$$A_p = L_p \cdot W_p \quad \text{Ec. 47}$$

$$A_x = b \cdot W_p \quad \text{Ec. 48}$$

Donde

- $L_p$  es la longitud de la placa expresada en m.
- $L_v$  es la longitud entre orificios expresada en m.
- $D_p$  es el diámetro de los orificios expresado en m.
- $D_e$  es el diámetro equivalente expresado en m.
- $b$  es la distancia entre placas expresada en m.
- $A_p$  es el área efectiva de transferencia de calor de una placa expresada en  $\text{m}^2$ .
- $W_p$  es la anchura de la placa expresada en m.
- $A_x$  es el área transversal entre placas expresada en  $\text{m}^2$ .

El fluido refrigerante se trata de agua y el fluido a enfriar, es una mezcla muy diluida de agua, por lo que se van a suponer las características de esta. Para el fluido frío (refrigerante) se denotan los parámetros con el subíndice “c” y para el caliente con “h”.

El objetivo del intercambiador es enfriar el fluido caliente desde  $90^\circ\text{C}$  a  $20^\circ\text{C}$ , utilizando para ello agua que entra al intercambiador a una temperatura de  $10^\circ\text{C}$ .

Para enfriar el fluido se usa el doble de caudal volumétrico de agua fría que de cerveza; en el caso que se estudia se desean tratar 50 litros en quince minutos, es decir el caudal volumétrico es de  $5,56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

A partir de los parámetros físicos que definen tanto el fluido frío como el caliente se calcula el número adimensional de Prandlt, según la Ec. 49.

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde

- $Pr$  es el número adimensional de Prandlt.
- $C_p$  es el calor específico, que en el caso del agua toma el valor de  $4,2 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ .
- $\mu$  es la viscosidad dinámica, que en el caso del agua toma un valor de  $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .



- $k$  es el coeficiente de conductividad térmica que en el caso del agua toma un valor de  $0,59 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

Así, el número adimensional de Prandtl adquiere un valor de 5,695 para ambos fluidos.

El calor intercambiado entre los fluidos se calcula según la Ec. 50, a partir de los datos del fluido caliente.

Según la ley de conservación de energía el calor cedido por el fluido caliente es igual al calor absorbido por el fluido frío; esta afirmación permite calcular la temperatura de salida del refrigerante.

$$Q = m_h \cdot C_{p_h} \cdot (T_{hi} - T_{h0}) = m_c \cdot C_{p_c} \cdot (T_{ci} - T_{c0}) \quad \text{Ec. 50}$$

Donde

- $Q$  es el calor intercambiado entre el fluido caliente y el frío, medido en W.
- $m_h$  es el flujo másico de fluido caliente medido en  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- $m_c$  es el flujo másico de fluido refrigerante medido en  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- $C_{p_h}$  y  $C_{p_c}$  es el calor específico del fluido caliente y del fluido frío respectivamente, que se supone igual al del agua en ambos casos, es decir,  $4,2 \cdot 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .
- $T_{hi}$  y  $T_{h0}$  son las temperaturas de salida y entrada respectivamente del fluido caliente, medidas en K.
- $T_{ci}$  y  $T_{c0}$  son las temperaturas de salida y entrada respectivamente del fluido frío, medidas en K.

Utilizando la Ec. 50 se obtiene que el calor intercambiado en el sistema es de  $1,625 \cdot 10^4 \text{ W}$  y la temperatura de salida del fluido refrigerante es de 317,85 K.

Una vez se disponen de los datos de temperatura de entrada y salida de los dos fluidos, se calcula la temperatura media logarítmica (Ec. 51) y el Número de Unidades de Transferencia - NUT (Ec. 52).

$$T_{ml} = \frac{(T_{hi} - T_{c0}) - (T_{h0} - T_{ci})}{\ln\left(\frac{T_{hi} - T_{c0}}{T_{h0} - T_{ci}}\right)} \quad \text{Ec. 51}$$

$$NUT = \frac{T_{hi} - T_{h0}}{T_{ml}} \quad \text{Ec. 52}$$

Tal y como se detalla en la Figura 22, se trata de una configuración 1:1 (1 paso de fluido caliente : 1 paso de fluido frío); Sabiendo esto y el NUT calculado (3,008) se determina el factor de corrección de la temperatura media logarítmica utilizando la Figura 24.

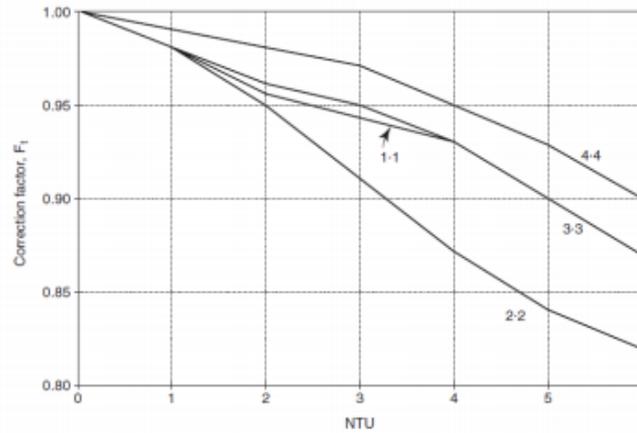


Figura 24. Factor de corrección de  $T_{ml}$  a partir del NUT para un intercambiador de calor de placas.

El valor del factor de corrección es de 0,94.

$$T_m = f \cdot T_{ml} \quad \text{Ec. 53}$$

Donde  $T_m$  es la temperatura media logarítmica corregida, medida en K,  $f$  es el factor de corrección y  $T_{ml}$  es la temperatura media logarítmica, que adquiere un valor de 23,27 K.

Para el cálculo del área total del intercambiador y del coeficiente global de transferencia de calor se necesita realizar un proceso iterativo, partiendo de un valor supuesto del coeficiente global de calor ( $U$ ) que se describe a continuación, a partir de las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{Q}{U \cdot T_{ml} \cdot f} \quad \text{Ec. 54}$$

$$N_p = \frac{A}{A_p} \quad \text{Ec. 55}$$

$$n = \frac{N_p - 1}{2} \quad \text{Ec. 56}$$

$$Re = \left( \frac{m}{\rho \cdot A_x \cdot n} \right) \frac{\rho \cdot D_e}{\mu} \quad \text{Ec. 57}$$

$$h = \frac{k}{D_e} (0,26 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,4}) \quad \text{Ec. 58}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{t_p}{k_p} + \frac{1}{h_c} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_h}} \quad \text{Ec. 59}$$

Donde

- $A$  es el área total de transferencia de calor expresada en  $m^2$ .
- $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor expresado en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ .
- $N_p$  es el número de placas del intercambiador.
- $A_p$  es el área efectiva de transferencia de calor de una placa expresada en  $m^2$ .
- $n$  es el número total de pasos de cada fluido entre las placas.
- $Re$  es el número de Reynolds calculado para cada fluido.



- $h_h$  y  $h_c$  son los coeficientes de convección para el fluido caliente y frío respectivamente, expresado en  $W \cdot m^{-2}$ .
- $t_p$  es el espesor de la placa expresado en m.
- $k_p$  es la conductividad térmica de la placa, que para el caso del acero inoxidable adquiere un valor de  $21 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .
- $R_c$  y  $R_h$  son los factores de ensuciamiento del fluido frío y caliente, que adquiere un valor de  $6000 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  en ambos casos.

Una vez resuelto el cálculo iterativo (Figura 25) se obtiene un valor del coeficiente global de calor de  $520,15 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  y se trata de 34 el número de placas mínimo que ha de tener el intercambiador para que su diseño sea óptimo.

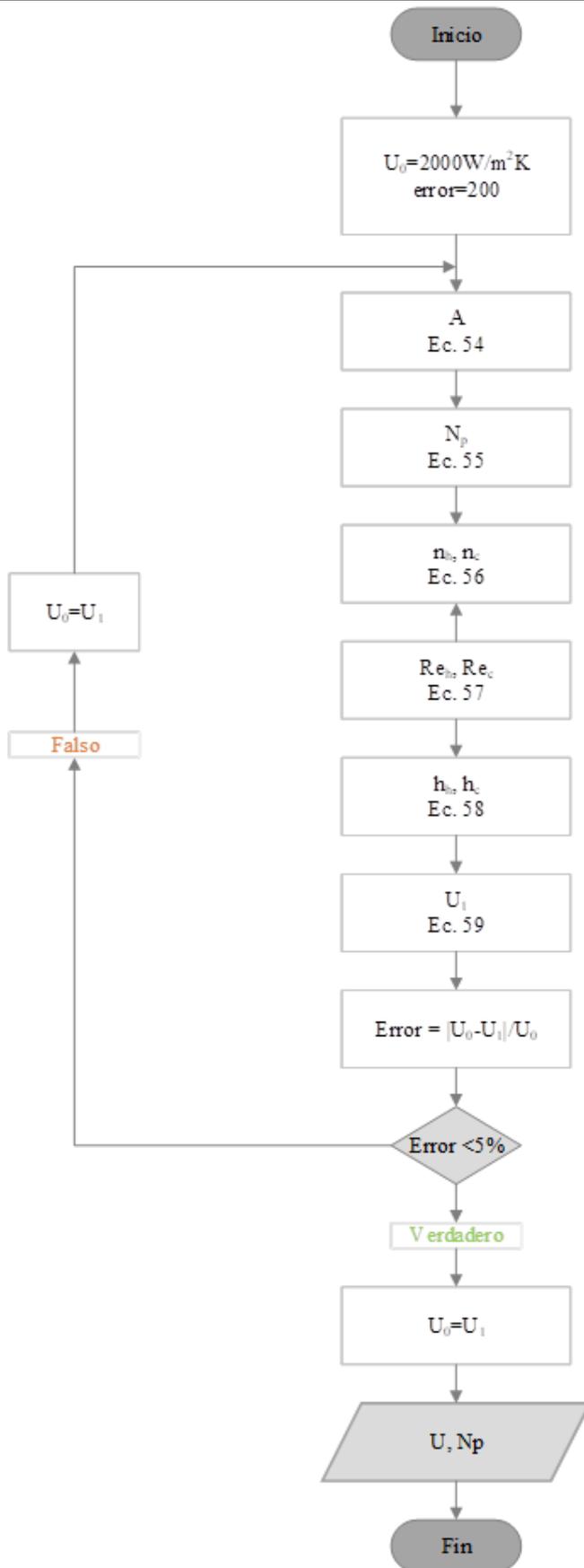


Figura 25. Diagrama para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor y el número de placas del intercambiador de calor de placas.



### 3.2.2. Cálculo de la caída de presión a través del intercambiador de calor

En este apartado, se calcula la caída de presión en el interior del intercambiador de calor de placas para el dimensionado de la bomba que impulsa el fluido caliente por su interior. Para ello se han de calcular los parámetros que se describen siguiendo las siguientes expresiones [7]:

$$j_f = 0,6 \cdot Re^{-0,3} \quad \text{Ec. 60}$$

$$\Delta P_p = 8 \cdot j_f \cdot \frac{L_p}{D_e} \cdot \frac{\rho \cdot u_p^2}{2} \quad \text{Ec. 61}$$

$$\Delta P_{pt} = 1,3 \cdot \frac{(\rho \cdot u_{pt})^2}{2} \cdot N_p \quad \text{Ec. 62}$$

$$A_p = \pi \left( \frac{D_p}{2} \right)^2 \quad \text{Ec. 63}$$

$$u_{pt} = \frac{m}{\rho \cdot A_p} \quad \text{Ec. 64}$$

Donde

- $j_f$  es un factor de fricción calculado según la Ec. 60.
- $Re$  es el número de Reynolds calculado en el epígrafe anterior.
- $\Delta P_p$  es la caída de presión en un plato de la placa.
- $L_p$  es la longitud de la placa expresada en m.
- $D_e$  es el diámetro equivalente expresado en m.
- $\rho$  es la densidad del fluido expresada en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- $u_p$  es la velocidad del fluido a través de las placas expresada en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- $\Delta P_{pt}$  es la caída de presión a través de los orificios de entrada y salida.
- $u_{pt}$  es la velocidad a través de los orificios de entrada y salida expresada en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- $N_p$  es el número de pasos del intercambiador.
- $A_p$  es el área de paso a través del orificio expresada en  $\text{m}^2$ .
- $D_p$  es el diámetro del orificio, expresado en m.
- $m$  es el caudal másico expresado en  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .

De esta forma, la caída de presión que se experimenta en el interior del intercambiador de calor de placas es de 0,636 bar, o lo que es lo mismo, 6,5 mca. para el fluido caliente.

### 3.3. Instrumentación y control

En cualquier proceso industrial es necesario tener bajo control el mayor número de variables que influyan en el mismo. En el caso que nos ocupa, las variables principales que se medirán y controlaran están relacionadas con la temperatura.

En el macerador se debe tener una temperatura que esté comprendida entre los 70 y 60 °C por lo que para tener noción de esta variable se introducirá una sonda de temperatura tipo PT100 de acero inoxidable. De igual forma el control de temperatura se realizará mediante el bombeo del agua de macerado a través de un serpentín de acero inoxidable alojado en el interior del hervidor. Para iniciar este proceso la bomba estará controlada por un relé que la conectará y desconectará en función de error establecido entre la temperatura del macerador y la temperatura consigna asignada.



Figura 26. Sonda de temperatura tipo PT100 de acero inoxidable.

En el caso del hervidor, que es el dispositivo que tiene las resistencias eléctricas que calentará el agua del proceso, se realizará una medida de la temperatura mediante una sonda tipo PT100 de acero inoxidable y por medio de relés de estado sólido se conectarán y desconectarán las resistencias eléctricas.



Figura 27. Relé de estado sólido.

Las dos PT100 dentro de un lazo de control son consideradas como sensores mientras que los relés son los actuadores. Las señales eléctricas generadas por los sensores serán enviadas a una tarjeta de adquisición de datos LabJack U12. Esta tarjeta se encuentra conectada a un ordenador en el que se ha programado un SCADA para controlar el proceso. En este software, en función de lo alejados que nos encontremos de la temperatura deseada (setpoint) se conectarán o desconectarán un número de resistencias.



Figura 28. Tarjeta de adquisición y control de datos LabJack U12.



La Figura 29 muestra la interfaz gráfica que puede apreciar el usuario mientras que en la Figura 30 y Figura 31 se muestra la secuencia de un control proporcional programada en el software usando como lenguaje C++.



Figura 29. Interfaz gráfica para el control de temperaturas.

```
File Edit View Quick Analysis Debug Layout Tools Window Help
Sequence: temperatura_macerador Apply & Compile Apply Discard
Thread Priority: 5 - Acquisition Auto-Start: 
1 while(1)
2 //Secuencia para controlar la temperatura del tanque de hervido
3 //Var.SPT1 es el setpoint de temperatura asignado por el usuario en este caso
4 // es de 80°C, y en función del error establecido entre el Set point y la temperatura
5 // medida se encenderá las 4 resistencias.
6 if (T2[0]<Var.SPT2*0.95)
7 RE1=1 //Las siglas RE hacen referencia a la Resistencia Electrica y el número es el número de resistencia
8 RE2=1
9 RE3=1
10 RE4=1
11 else
12 RE1=0
13 RE2=0
14 RE3=0
15 RE4=0
16
17 endif
18 Var.Rele1=RE1[0] //Estos comandos son necesarios para la interfaz gráfica
19 Var.Rele2=RE2[0]
20 Var.Rele3=RE3[0]
21 Var.Rele4=RE4[0]
22 delay(10)
23 endwhile
```

Figura 30. Secuencia de control de temperatura en el tanque de hervido.

```
File Edit View Quick Analysis Debug Layout Tools Window Help
Sequence: temperatura_macerador Apply & Compile Apply Discard
Thread Priority: 5 - Acquisition Auto-Start: 
1 while(1)
2 //Secuencia para controlar la temperatura del tanque de macerado
3 //Var.SPT2 es el setpoint de temperatura asignado por el usuario en este caso
4 // es de 68°C, y en función del error establecido entre el Set point y la temperatura
5 // medida se encenderá la bomba (mediante un relé) de recirculado por el serpentín.
6 if (T2[0]<Var.SPT2*0.97)
7 Bomba=1 //Conectará el relé de la bomba
8 else
9 Bomba=0
10 endif
11 Var.Bomba=Bomba[0] //Este comando es necesario para la interfaz gráfica
12 delay(10)
13 endwhile
```

Figura 31. Secuencia de control de temperatura en el tanque de maceración.



# CAPÍTULO 4: PROTOCOLOS DE SEGUIMIENTO DE PRODUCCIÓN

En esta sección del TFG se presentan los distintos protocolos de seguimiento del proceso productivo con el fin de asegurar un control de calidad del producto que permita la uniformidad de los lotes y, de igual forma, que el alumnado adquiera conocimientos de distintas metodologías analíticas.

## 4.1. pH del agua

La materia prima mayoritaria en la fabricación de cerveza es el agua, por lo que es necesario el estudio de sus características, ya que su calidad tiene una gran influencia sobre la calidad del producto final.

El pH influye de muchas maneras en la calidad de una cerveza [4]. En el macerado el agua empleada debe poseer un pH de 5,2 a 5,7 y para ello se ajustará el mismo por medio de adición de ácido fosfórico o ácido láctico realizando la medida mediante un electrodo de pH previamente calibrado.

## 4.2. Análisis del almidón durante el macerado

Durante la etapa de maceración se debe realizar un seguimiento del contenido en almidón del mosto ya que es en esta etapa donde las amilasas presentes en la malta rompen los enlaces que forma el almidón para generar azúcares fermentables. Para su análisis se toma una alícuota del caldo cada quince minutos durante el tiempo que permanece en el tanque de maceración.

Se toman 0,1 mL del mosto y se mezclan con 0,9 mL de HCl 1 N agitando vigorosamente.

En un nuevo recipiente se mezclan 0,1 mL de la disolución anterior con 0,9 mL de una disolución yodada (50 g/L KI + 5 g/L I<sub>2</sub>). Finalmente se toma 1 mL de esta segunda disolución y se mide la absorbancia a 620 nm. El mismo protocolo fue realizado previamente a una



disolución stock de almidón de patata para obtener una recta patrón (Figura 42) que permita cuantificar el contenido de este compuesto en la disolución problema.

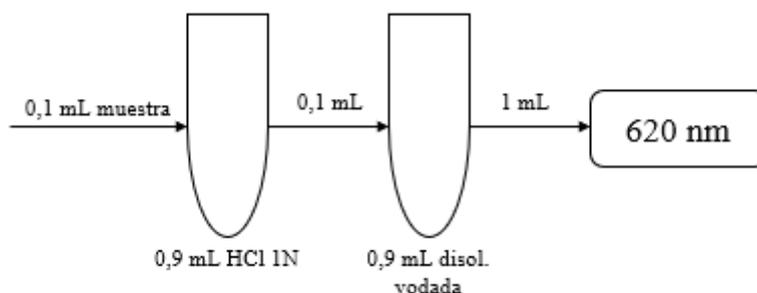


Figura 32. Esquema de operación para análisis de almidón.

### 4.3. Análisis de la maltosa durante el macerado

Durante el proceso de maceración se va produciendo la reacción de sacarificación del almidón dando lugar a azúcares fermentables mediante la acción enzimática de las amilasas, por lo que es interesante el análisis de los azúcares fermentables a lo largo del proceso de maceración. Para su análisis se toma una alícuota del caldo cada diez minutos durante el tiempo que permanece en el tanque de maceración.

Cada 15 min se tomarán 10 mL de muestra del tanque de maceración y serán filtrados. Seguidamente se tomará 1 mL de mosto y se mezclará con 1 mL de disolución preparada con 10 g/L de ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), 10 g/L de NaOH y 0,5 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> en un tubo de vidrio pyrex y se calientan a 90 °C durante 10 min. Una vez transcurrido este tiempo se enfría el tubo de vidrio rápidamente introduciéndolos en agua fría. Coger 0,1 mL de la mezcla y diluir con 0,9 mL de agua destilada en una cubeta de plástico y medir la absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 575 nm. Para tener noción de la cantidad de azúcares fermentables producidos se realizó el mismo protocolo con una disolución stock de glucosa que permitió obtener una recta patrón (Figura 44).

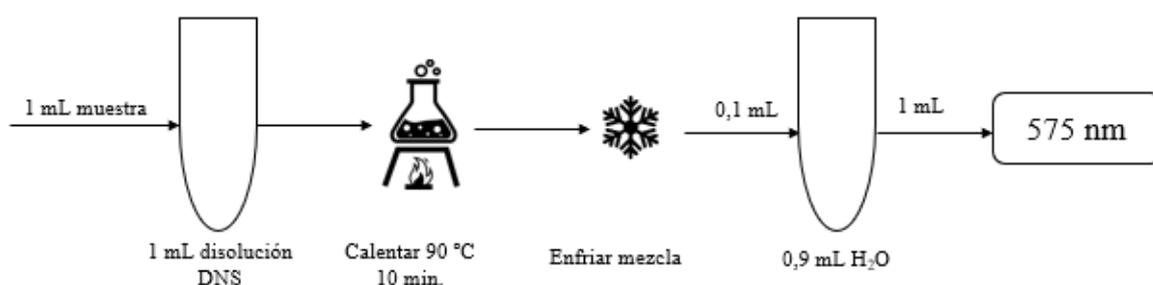


Figura 33. Esquema de operación de análisis de azúcares fermentables.

### 4.4. Análisis de sólidos solubles durante el macerado

La medición de sólidos solubles en el mosto permite una buena estimación del contenido de azúcar presente en el mismo ya que la mayoría de los componentes de la materia soluble son azúcares y ácidos orgánicos.

La determinación de este parámetro se realiza a través de un refractómetro digital, que fundamentado en el fenómeno físico de refracción a través del fluido proporciona una medida expresada en ° Brix, que es directamente proporcional a la cantidad de sólidos disueltos.

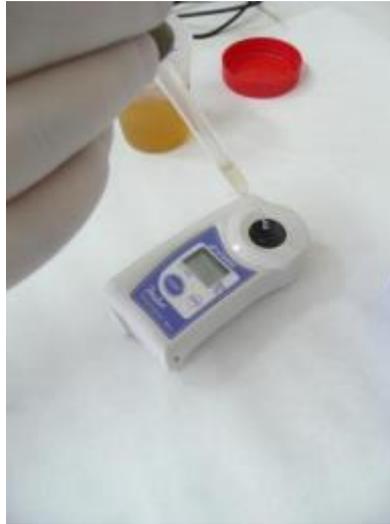


Figura 34. Medida de sólidos solubles a través de refractometría.

Para la medida de ° Brix es necesario realizar un blanco vertiendo unas gotas sobre la lente del refractómetro digital de agua destilada y pulsando el botón *zero*. Se seca la lente cuidadosamente y se vierten unas gotas del mosto pulsando el botón *start* que proporciona el valor de ° Brix en la pantalla.

#### 4.5. Grado de alcohol

Habitualmente se cuantifica el contenido en alcohol por medio de la comparación de la densidad del líquido antes y después del proceso de fermentación.

Para la medida de la densidad se utiliza un densímetro, un instrumento de medida fabricado en vidrio, con un bulbo pesado en el extremo que le permite flotar verticalmente al introducirse en el líquido. Dependiendo de la densidad del líquido el instrumento se sumerge en él siguiendo el Principio de Arquímedes.

Cuando un líquido aumenta su temperatura se expande, ocupando un volumen mayor, lo que implica un descenso de la densidad según la Ec. 65.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. 65}$$

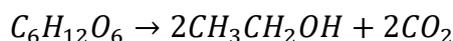
Donde  $\rho$  es la densidad del fluido expresada en  $\text{kg/m}^3$ ,  $m$  es la masa del fluido del que se quiere medir la densidad expresada en  $\text{kg}$  y  $V$  es el volumen que ocupa el fluido expresado en  $\text{m}^3$ .

Por ello, el densímetro está calibrado para proporcionar el valor de densidad cuando el fluido se encuentra a  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Antes de comenzar el proceso de fermentación se realiza una primera medida con el densímetro, designando el valor de densidad original ( $\rho_0$ ).



Durante el proceso de fermentación tiene lugar la reacción por la cual la glucosa que contiene el mosto ( $C_6H_{12}O_6$ ), es fermentada por la levadura produciendo alcohol etílico ( $CH_3CH_2OH$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ).



Según la reacción, por cada mol que se produce de alcohol etílico, un mol de dióxido de carbono se escapa, o lo que es lo mismo, por cada gramo de alcohol etílico se produce 1,05 gramos de dióxido de carbono como se especifica a continuación:

$$1 \text{ kg } CO_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol } CO_2}{44,0098 \text{ kg } CO_2} \cdot \frac{1 \text{ kmol } CH_3CH_2OH}{1 \text{ kmol } CO_2} \cdot \frac{46,07 \text{ kg } CH_3CH_2OH}{1 \text{ kmol } CH_3CH_2OH} = 1,05 \text{ kg } CH_3CH_2OH$$

El descenso de densidad que el fluido va experimentando a lo largo de la fermentación, se debe a la cantidad de  $CO_2$  que se ha ido eliminando; o lo que es lo mismo, la masa de alcohol que se genera es 1,05 veces la cantidad de  $CO_2$  eliminada (la diferencia de densidad).

El porcentaje de alcohol en masa se calcula por tanto según la Ec. 66.

$$\%Alcohol \text{ masa} = \frac{\rho_0 - \rho_f}{\rho_f} \cdot 1,05 \cdot 100 \quad \text{Ec. 66}$$

En Europa, la forma más habitual de expresar el grado de alcohol es con el porcentaje de alcohol en volumen (%ABV).

$$\%ABV = \frac{\%Alcohol \text{ masa}}{\rho_{CH_3CH_2OH}} = \frac{\rho_0 - \rho_f}{\rho_f} \cdot 132,9 \quad \text{Ec. 67}$$

Donde % Alcohol masa es el porcentaje másico de alcohol en el fluido,  $\rho_0$  y  $\rho_f$  son la densidad del mosto medida a 20 °C antes de iniciar el proceso de fermentación y conforme va transcurriendo la fermentación respectivamente, expresadas en  $kg \cdot L^{-1}$ ; %ABV es el porcentaje de alcohol en volumen que contiene el fluido y  $\rho_{CH_3CH_2OH}$  es la densidad del alcohol etílico a 20°C, que se corresponde con  $0,79 \text{ kgL}^{-1}$ .

Antes de comenzar el proceso de fermentación se deben tomar en una probeta de 500 mL a 20 °C utilizando el termómetro y medirse la densidad con el densímetro ( $\rho_0$ ). Durante todo el proceso de fermentación, se deben tomar muestras cada día en la probeta para ver la evolución de la densidad a 20 °C y por extensión del contenido alcohólico con el densímetro.

#### 4.6. Amargor (Grados IBUs)

El sabor amargo de la cerveza es una de las características más importantes de esta bebida. El lúpulo es el ingrediente responsable de aportar este sabor a la cerveza, en concreto, los iso- $\alpha$ -ácidos que contiene.

Una forma de determinar el grado de amargor de la cerveza es mediante la unidad internacional de amargor (International Bitterness Unit – IBU), que equivale a un miligramo iso- $\alpha$ -ácidos por litro de cerveza.

Para su análisis se toman 10 mL de muestra y se mezclan con 0,5 mL de HCl 6M y con 20 mL de iso-octano, que actúa como agente extractor de los iso- $\alpha$ -ácidos. Se agita la mezcla durante 2 min a 20°C. Una vez preparado el extracto, se pasa 1 mL a una cubeta de plástico y

se mide su absorbancia a 275 nm. Posteriormente se calculan los grados IBUs según la Ec. 68 si la muestra se trata de cerveza final y la Ec. 69 si se trata del mosto [10].

$$IBU = 50 \cdot ABS_{275} \quad Ec. 68$$

$$IBU = 100 \cdot ABS_{275} \quad Ec. 69$$

Donde IBU es el grado de amargor de la cerveza y  $ABS_{275}$  es la absorbancia del extracto medido a una longitud de onda de 275 nm.

## 4.7. Color

El color de la cerveza obtenida es un parámetro importante a tener en cuenta en el control de calidad. Su medida dependía de la percepción que cada individuo podía tener, por lo que variaba dependiendo del observador.

Con la llegada del espectrofotómetro, la “European Brewing Convention” instauró un sistema según el cual se asigna un grado numérico (EBC) según la absorbancia medida en el espectrofotómetro a 430 nm.

$$EBC = 25 \cdot D \cdot ABS_{430} \quad Ec. 70$$

Donde EBC es el grado de color según la “European Brewing Convention”, D es el factor de dilución de la muestra y  $ABS_{430}$  es la absorbancia medida a una longitud de onda de 430 nm en el espectrofotómetro.

	SRM	Beer Color	EBC
Pale Lager	2		4
German Pilsener	3		6
Pilsner Urquell	4		8
	6		12
Weissbier	8		16
Bass Pale Ale	10		20
	13		26
Dark Lager	17		33
	20		39
	24		47
Porter	29		57
Stout	35		69
	40		79
Imperial Stout	70		138

Figura 35. Equivalencia del color de la cerveza con EBC.

En un vaso de precipitados, recoger una alícuota de la muestra de cerveza problema y agitar con una varilla de vidrio para degasificarla. Filtrar la muestra usando papel de filtro y un embudo y se toma 1 mL del filtrado para medir la absorbancia a 430 nm.



# CAPÍTULO 5: HIGIENIZACIÓN Y LIMPIEZA DE LOS EQUIPOS

En la industria alimentaria es de especial importancia el cumplimiento de las normas de higiene y limpieza con el fin de minimizar los riesgos en la salud del consumidor.

Con el fin de combatir la proliferación de microorganismos que producen la contaminación de los alimentos, se recurre a la limpieza y desinfección de los equipos que se encuentran en contacto con el producto.

Mientras que la limpieza hace referencia a la eliminación de la suciedad, la desinfección consiste en eliminar el mayor número de bacterias nocivas posibles; en el caso en el que la eliminación de bacterias fuese total, se estaría hablando de esterilización.

El diagrama de Sinner (Figura 36) representa los factores clave en la limpieza.



Figura 36. Diagrama de Sinner.



La temperatura, el tiempo, la acción mecánica y química son variables que deben compensarse con el fin de mantener la máxima calidad de la limpieza.

Los elementos necesarios para la limpieza y desinfección son:

- **Agua:** Se trata del producto más utilizado en el proceso de limpieza e higienización.
- **Agentes de limpieza (detergentes):** Son productos añadidos al agua que incrementan su poder limpiador. En función del tipo de suciedad se recomienda utilizar un detergente u otro.

Tabla 17. Detergentes recomendados en función del tipo de suciedad.

Suciedad	Detergente recomendado
<b>Proteína</b>	Alcalino muy oxidante
<b>Grasas/aceites</b>	Alcalino
<b>Azúcares</b>	Alcalino
<b>Sales insolubles</b>	Ácido

- **Agentes de desinfección:** Son aquellos capaces de eliminar casi en su totalidad el número de microorganismos que hay en una superficie. Los desinfectantes más utilizados son:
  - Hipoclorito de sodio: Activo frente a Gram-positivas, Gram-negativas, virus, esporas y bacilo de la tuberculosis.
  - Aldehídos: Activo frente a Gram-negativas y *Pseudomonas*.
  - Glutaraldehído: Bactericida de elevada potencia activo frente a Gram-positivas, Gram-negativas, virus, micobacterias y algunos hongos.
  - Clorhexidina: Activo frente a Gram-positivas, Gram-negativas y virus con cubierta y medianamente activo frente a *Proteus*, *Pseudomonas* y micobacterias.
- **Utensilios para la limpieza:** Los útiles de limpieza tales como cepillos, esponjas, bayetas, etc. deben estar limpios antes de su utilización y evitar entrar en contacto con el suelo.
- **Elementos de protección personal** tales como guantes, mascarillas y delantales plásticos.

En la Tabla 18 se detalla el tipo de desinfectante utilizado en función del material de la superficie.

Tabla 18. Aplicación del detergente en función de la superficie.

Material	Limpieza	Desinfectante	Tiempo	Enjuague
Caucho y polietileno	Detergente degradante (enzimático)	Clorhexidina acuosa al 0,1%	10 min.	Sí
Superficies metálicas	Detergente	Aldehídos	10 min.	Sí
Zonas de lavado	Detergente	Hipoclorito de sodio	10 min.	Sí
Suelos, paredes y techos	Detergente	Hipoclorito de sodio	10 min	No

# CAPÍTULO 6: RESULTADOS Y CONCLUSIONES

## 6.1. Comprobaciones del equipo

Para verificar la bondad del dimensionado teórico se realizaron diversas pruebas en los distintos dispositivos diseñados.

### 6.1.1. Calentamiento de agua en el hervidor

Se llenó el hervidor con un volumen de 50 L de agua dulce y se conectaron las 4 resistencias del dispositivo. La Figura 37 muestra la evolución temporal de la temperatura desde 60°C a 77 °C (temperatura a la cual se calentaría el agua para incorporar la malta).

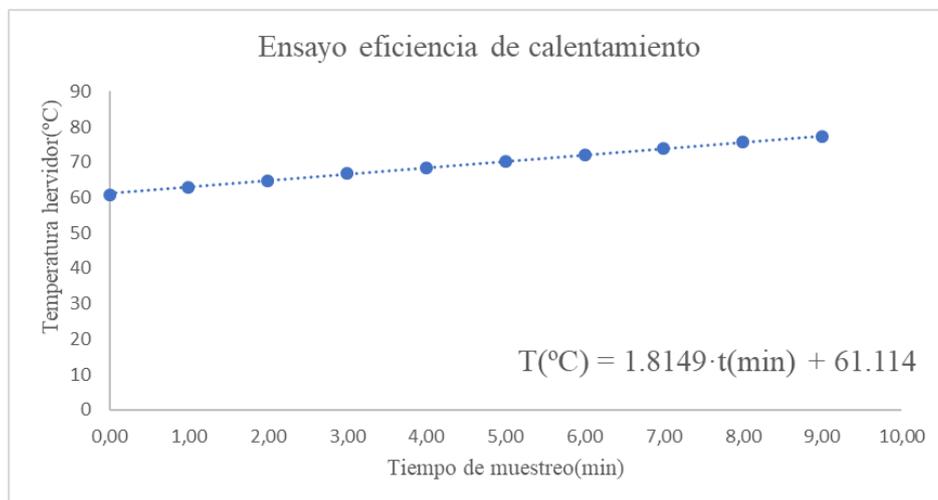


Figura 37. Gráfico de la evolución de la temperatura en el tanque de hervido en función del tiempo de calentamiento.

Calculando el tiempo teórico de calentamiento con las expresiones mostradas en el apartado de especificaciones técnicas (epígrafe 3.1.2.2) considerando 50 L de agua a 20°C y buscando una temperatura final de 78 °C se obtendría un tiempo teórico de 33,67 min mientras que teniendo en cuenta la pendiente de la Figura 37 y el mismo salto térmico se obtendría un tiempo de calentamiento de 32,22 min. Esta comprobación muestra que el dimensionado de este dispositivo ha sido correcto.



### 6.1.2. Aislamiento térmico del macerador

Para verificar el buen funcionamiento del aislamiento térmico de este dispositivo se realizaron dos ensayos:

1. Se llenó el macerador sin capa aislante con agua a 68 °C y se registró la evolución de la temperatura
2. Se aisló el macerador con una capa de ARMAFLEX de 1,5 mm de espesor y se volvió a llenar el macerador para registrar nuevamente la evolución temporal de la temperatura.

En la Figura 38 se muestran los datos obtenidos de estos dos ensayos, así como los límites superior e inferior de temperatura establecidos para que la maceración sea óptima. Como se puede apreciar, el descenso térmico para el tanque sin aislamiento es mucho más acusado que para el tanque aislado. Tanto que, con aislamiento, el macerador no sobrepasa los límites de temperatura en los 80 minutos mientras que en el que no tiene aislamiento, en torno al minuto 40 se rebasa el límite inferior.

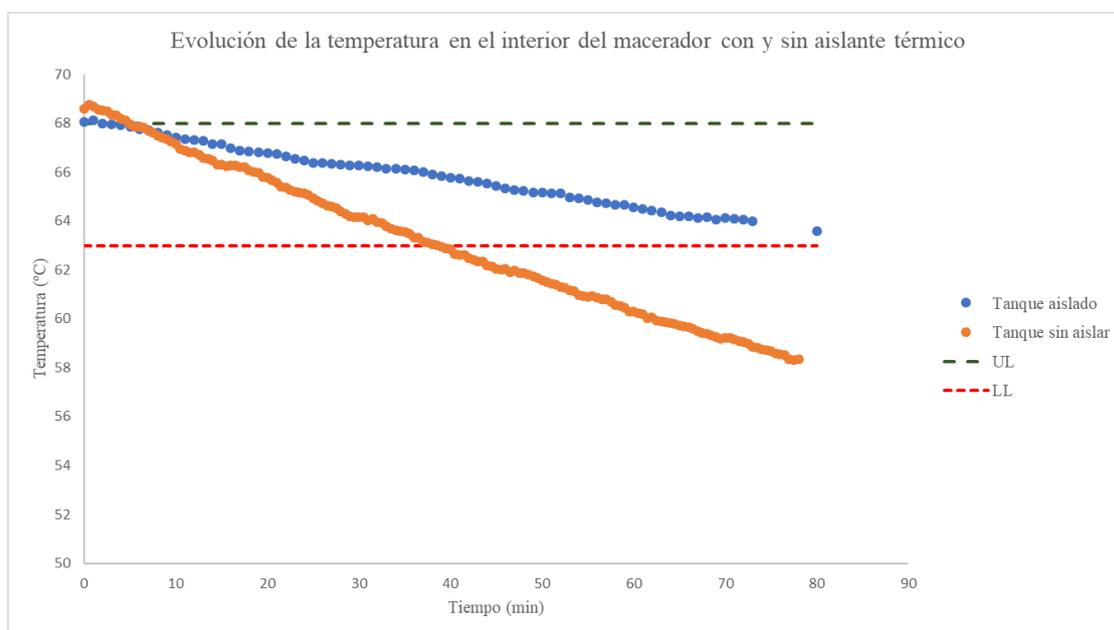


Figura 38. Ensayo de efectividad de aislamiento térmico en el macerador.

### 6.1.3. Calentamiento del agua de maceración para el control térmico del proceso

Como se ha comentado con anterioridad, en el macerado se produce la conversión de azúcares no fermentables como el almidón en otros fermentables. Para ello es necesario la actividad enzimática de las amilasas. En la Figura 39 se muestra las temperaturas óptimas de cada enzima que participa en el proceso de macerado.

En este TFG inicialmente se diseñaron los equipos para una maceración simple (se mantiene la temperatura entre 70°C - 64°C) pero con la incorporación de un serpentín en el interior del equipo de hervido se puede lograr un proceso de maceración multietapa.

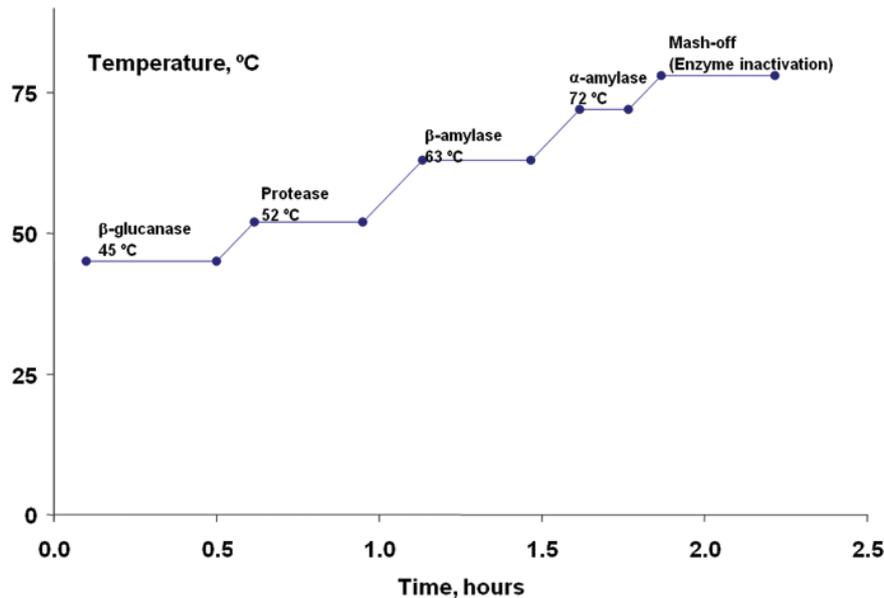


Figura 39. Temperaturas óptimas de conversión de cada enzima.

Para la verificación de este punto se llenó nuevamente el tanque de maceración aislado térmicamente con ARMAFLEX con 50 L de agua a 55 °C; por otro lado, se llenó el hervidor con otros 50 L de agua que se calentaron hasta unos 80 °C. En el hervidor, hay un agitador tipo hélice para aportar mezcla y favorecer el intercambio de calor. A continuación, se introdujo el serpentín en el hervidor y se conectó el macerador por medio de una bomba ( $5,77 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ) al serpentín y este nuevamente al macerador. Por último, se realizó un registro temporal de la evolución de la temperatura del líquido contenido en el macerador hasta completar un salto térmico de unos 11°C. Para ver la influencia real de la mezcla en la transferencia de energía se ensayaron dos velocidades de agitación (15 y 80 rpm).

En la Figura 40 se puede observar que el dimensionado del serpentín es correcto ya que alcanza la temperatura deseada en un tiempo no muy distinto del teórico. Por otro lado, Se observa que a mayor turbulencia la transferencia de energía es mayor y se alcanza antes la temperatura deseada. A la vista de estos resultados, se puede afirmar que el equipo diseñado en este TFG permite un proceso de maceración multietapa.

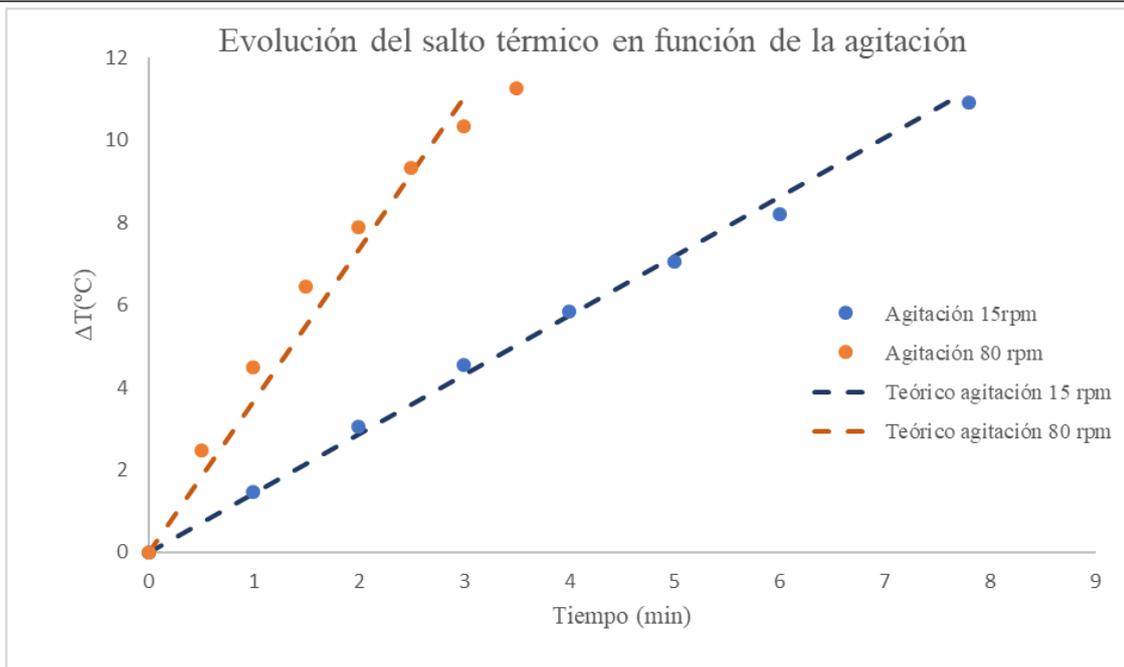


Figura 40. Gráfico de diferencias en el salto térmico en función de la agitación.

#### 6.1.4. Verificación de la capacidad de enfriado del cambiador de placas

Para realizar este ensayo se le asignó un *setpoint* de temperatura del agua contenida en el hervidor de 80°C y una tolerancia máxima de descenso de temperatura de 5°C, punto en el cual se conectarán las resistencias eléctricas para restituir el valor de temperatura.

Para el caso del agua de macerado se estableció un *setpoint* de temperatura de 68°C con una tolerancia inferior de 2 °C. La Figura 41 muestra la evolución de las temperaturas de hervidor y macerador para el estudio realizado.

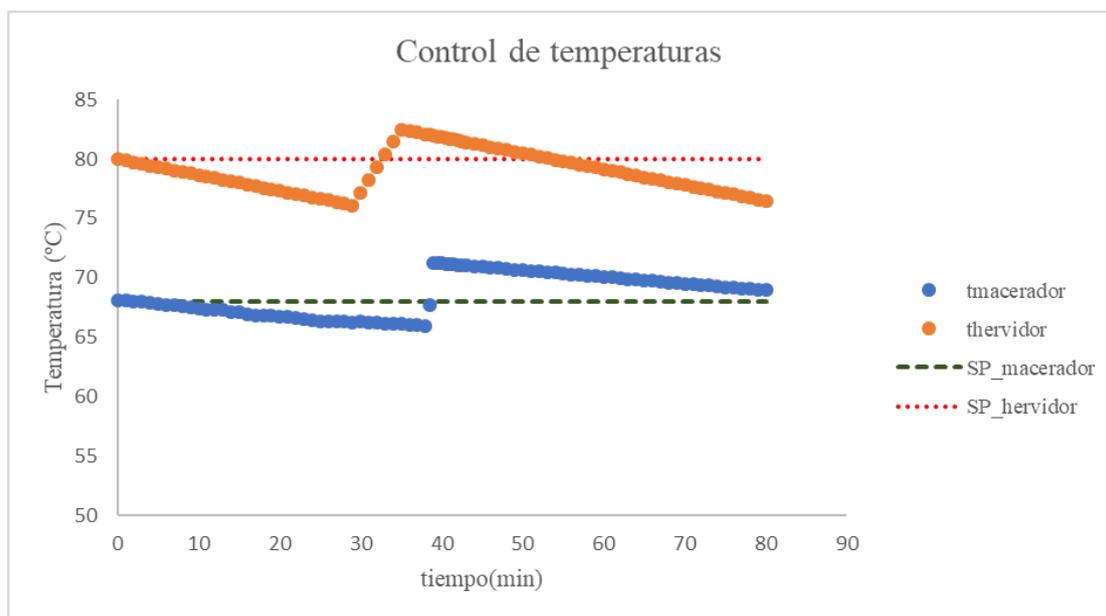


Figura 41. Evolución de temperaturas para el ensayo del controlador.



Se puede observar como el descenso térmico en el hervidor es más acusado, ya que este dispositivo no se encuentra aislado térmicamente, mientras que el macerador sí. Por otro lado, observando el comportamiento de ambas temperaturas se puede afirmar que el proceso se encuentra controlado. Si bien es cierto que la evolución temporal de ambas gráficas muestra la tendencia clara de un control tipo proporcional en el que se establece un error tanto positivo como negativo respecto al *setpoint* (offset)

## 6.2. Elaboración de un lote de 30 litros

Una vez construido el equipo diseñado según los apartados previos, se llevó a cabo la fabricación del primer lote, en el que se comprobó la eficiencia del equipo además de los protocolos de seguimiento de la producción.

A continuación, se detallan los pasos a seguir para la fabricación de 30 L de cerveza siguiendo la receta de American Pale Ale manteniendo una relación de empaste de 2,5 (Tabla 2).

Antes de empezar, todo el material que esté en contacto con las materias primas debe estar limpio y esterilizado.

En el tanque de hervido se ponen 50 litros de agua mineral a la que se ha ajustado el pH a 5,5 con ácido ortofosfórico y se calienta hasta alcanzar 78 °C. Una vez alcanzada la temperatura se acciona la bomba que permite el paso del líquido al tanque de maceración hasta conseguir 21 L de agua en el macerador a los que se le añaden 7,5 kg de malta Pale Ale y 0,3 kg de malta Caraamber, removiendo bien para asegurar que todos los granos están sumergidos y facilitar el proceso de sacarificación.

Se cambia la configuración para conseguir que la temperatura de maceración oscile en torno a los 65°C y se deja macerar durante 90 minutos.

Durante el proceso de maceración se fue haciendo un seguimiento del contenido de almidón, maltosa y sólidos solubles en el mosto para lo cual se fueron tomando muestras cada 15 minutos.

Una vez completada la etapa de maceración comienza el proceso de aspersion, en el que se va sacando lentamente el mosto filtrado por la parte inferior del tanque y se añaden hasta 30 L de agua a 78°C por la parte superior.

Todo el contenido líquido pasa al tanque de hervido, en el que se eleva la temperatura hasta llegar a ebullición. Por otro lado, se saca todo el bagazo (restos sólidos del macerado) y se limpia el macerador.

Cuando comienza el hervido se produce la primera lupulización, para lo cual se infusionan 0,7 g de flor de lúpulo.

Durante esta etapa se produce la esterilización del líquido y además permite el asentamiento de las proteínas que están disueltas.

A los 50 minutos de hervido se produce la segunda lupulización, en la que se añaden 6 g de lúpulo junto con 7,5 g de Irish Moss y dejar hervir durante 10 minutos más tras los cuales se apagan las resistencias y se deja reposar durante 5 minutos.



En el proceso de hervido se fueron tomando alícuotas cada 10 minutos para el análisis del amargor y el color del jugo.

Cuando finaliza el proceso de cocción se lleva a cabo el enfriamiento del mosto hasta 18 °C a través del intercambiador de calor, en el que se utiliza agua corriente como agente refrigerante.

El mosto frío se lleva al fermentador y se le añaden 12 g de levadura disuelta en agua y se agita el tanque para provocar la aireación del líquido. Se toma una muestra para medir la densidad, que debe estar en 1050 kg·m<sup>-3</sup>. En caso de que el líquido sea más denso se añade agua hasta alcanzar el valor deseado.

El tanque de fermentación permanece en una cámara refrigerada a 18 °C durante los 10 días en los que transcurre el proceso durante los cuales se toman muestras diarias para la medida de la densidad, y con ella el cálculo del contenido de alcohol de nuestra cerveza.

Una vez finalizada esta primera fermentación tiene lugar el embotellado, en el que a través de una bomba peristáltica se trasvasa la cerveza a los envases previamente esterilizados, a los que se añaden 7,5 g de azúcar moreno, que favorece el crecimiento de la levadura y con él la carbonatación de la cerveza.

La cerveza debe permanecer en su envase al abrigo de la luz y el calor durante 12 días antes de su consumo.

#### 6.2.1. Evolución del contenido de almidón durante la maceración

Para el análisis del almidón es necesario realizar una recta patrón que correlacione el dato de absorbancia obtenido a una longitud de onda de 620 nm con la concentración de almidón en la muestra expresada en g/L.

Tabla 19. Valores de la recta patrón de almidón.

<b>Concentración almidón (g/L)</b>	<b>ABS (620 nm)</b>
0	0
1,25	0,222
2,5	0,523
5	1,055
7,5	1,564
10	1,885

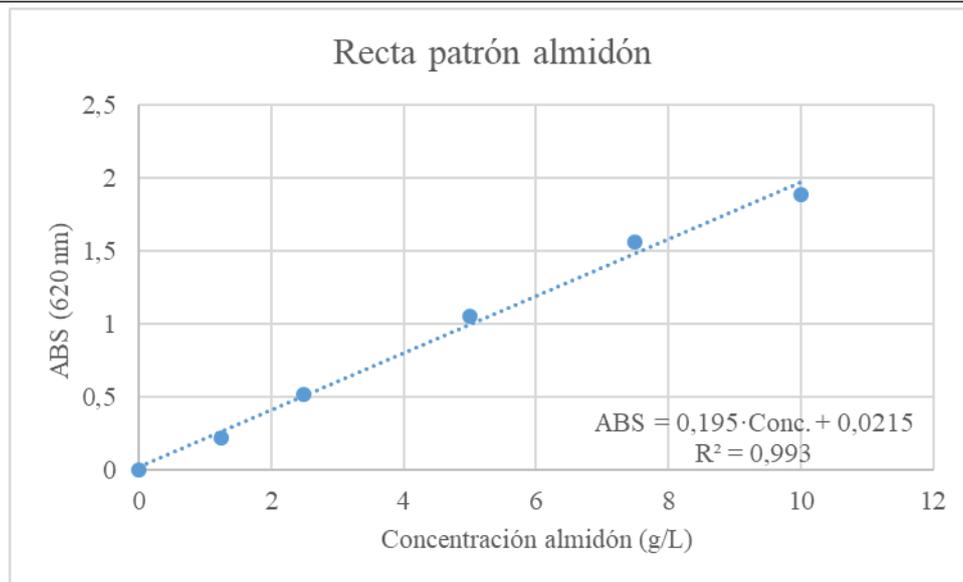


Figura 42. Gráfico de la recta patrón del almidón

En la Figura 42, se observa la ecuación de la recta patrón con una muy buena correlación de los datos con la que se representan los datos obtenidos durante el proceso de maceración.

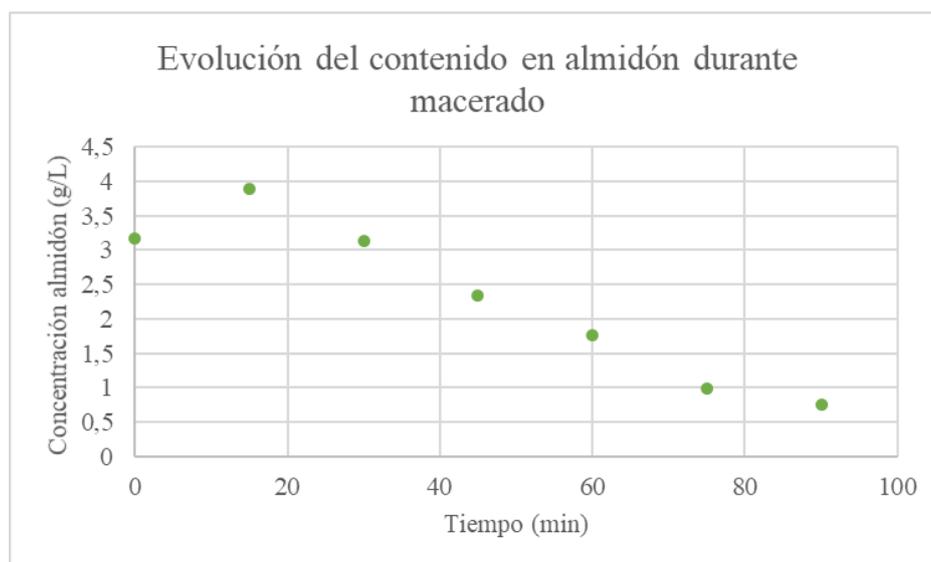


Figura 43. Evolución del contenido de almidón durante el macerado.

Tal y como se detalla en el epígrafe 2.2.2.1, durante el proceso de maceración, la concentración de almidón va disminuyendo con el tiempo, ya que se convierte en azúcares fermentables. En la Figura 43 se muestra cómo tiene lugar este fenómeno ya que al comenzar el proceso se produce un repunte debido a la mezcla de los granos de malta al entrar en contacto con el agua a partir del cual se produce el descenso de la concentración de almidón hasta llegar a la fase final donde parece estabilizarse la concentración debido a la finalización del proceso de sacarificación.

#### 6.2.2. Evolución del contenido de maltosa durante la maceración

De la misma forma que se procede en el caso del almidón, se realiza una recta patrón con disoluciones de concentración conocida de maltosa para el análisis de esta. En la Tabla 20



se muestran los datos de las absorbancias medidas a una longitud de onda de 575 nm correspondientes a cada uno de los patrones de maltosa.

Tabla 20. Valores de la recta patrón de maltosa.

Concentración maltosa (g/L)	ABS (575 nm)
0	0
2	0,090
4	0,219
8	0,398
10	0,477

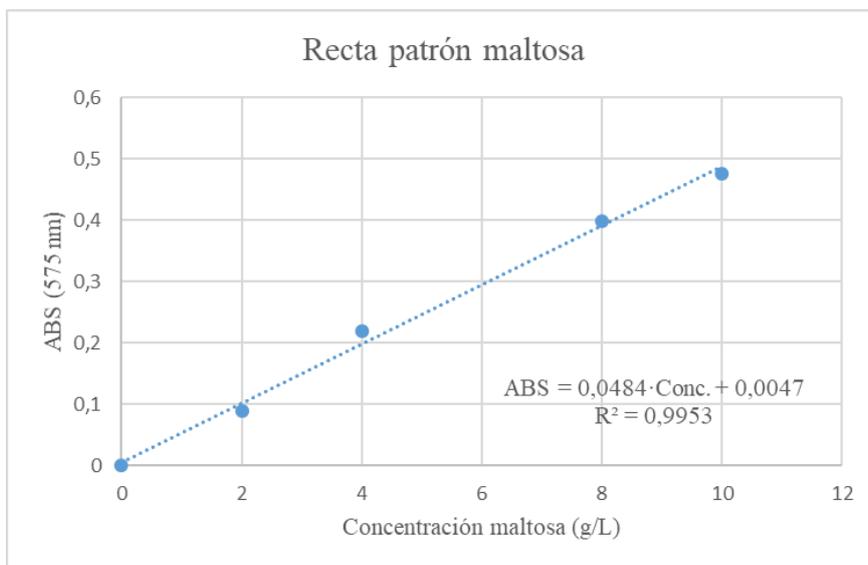


Figura 44. Gráfico de la recta patrón de la maltosa.

En la Figura 44, se observa la ecuación de la recta patrón de la maltosa con una muy buena correlación de los datos con la que se representan los datos obtenidos durante el proceso de maceración.

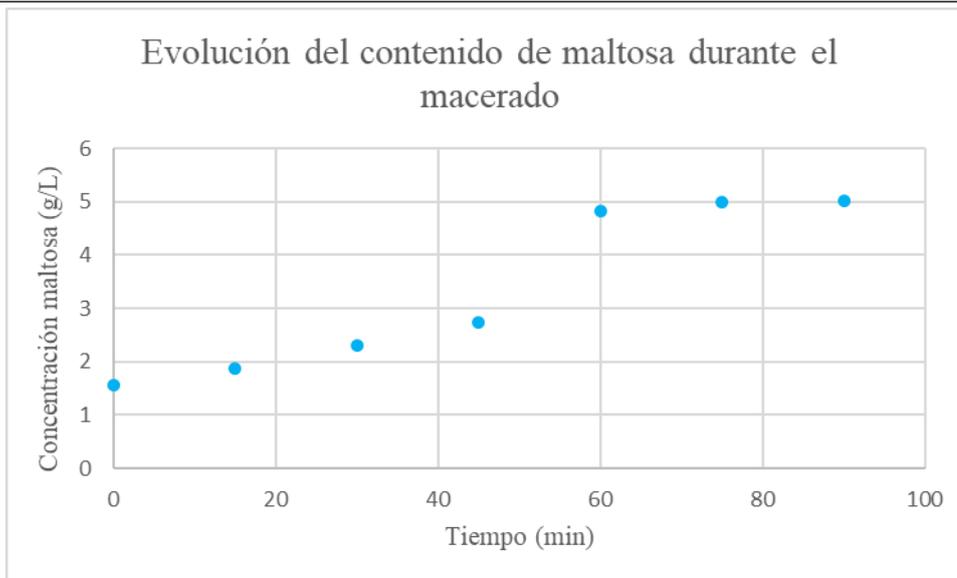


Figura 45. Evolución del contenido de maltosa durante la maceración.

Conforme va disminuyendo el contenido de almidón se produce un aumento de los azúcares fermentables, entre los que se encuentra la maltosa. Tal y como se muestra en la Figura 45 el aumento de esta sustancia se produce lentamente al comienzo hasta llegar al minuto 60 donde se produce un aumento significativo, a partir del cual se estabiliza la concentración al igual que ocurre en el caso el almidón.

### 6.2.3. Evolución de la concentración de sólidos solubles durante la maceración.

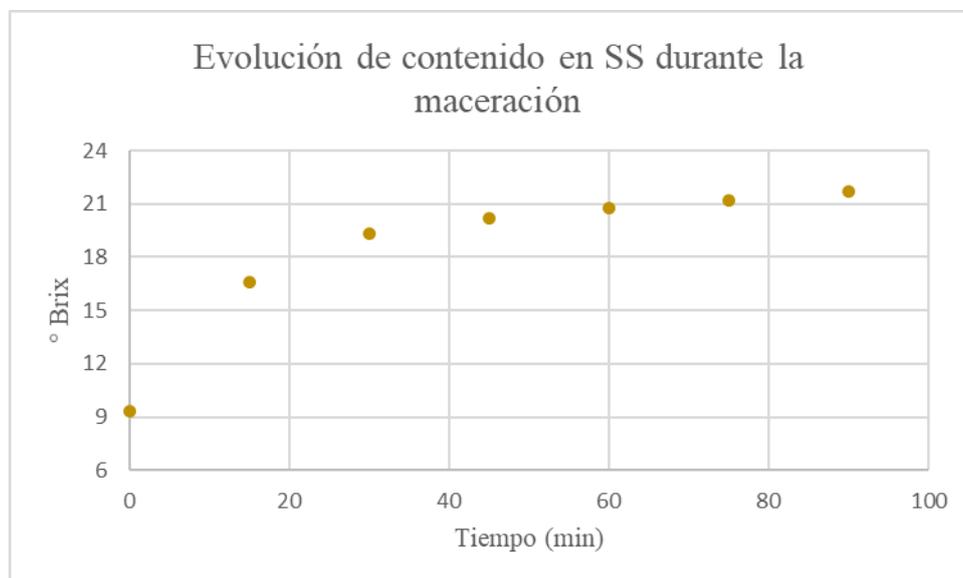


Figura 46. Gráfico de la concentración de SS en función del tiempo de hervido.

En el epígrafe 4.4 se explicaba cómo los sólidos solubles disueltos en el mosto están compuestos principalmente por azúcares, por lo que su análisis según la Figura 46 permite verificar que se produce el crecimiento de diferentes tipos de azúcares ya que la gráfica mostrada en la Figura 46 difiere de la Figura 45.



#### 6.2.4. Evolución del amargor durante el hervido

Las muestras tomadas cada 10 minutos durante el proceso de hervido, permitieron analizar la evolución del amargor en el mosto. En la Figura 47 se muestra la tendencia de los grados *IBUs* en función del tiempo.

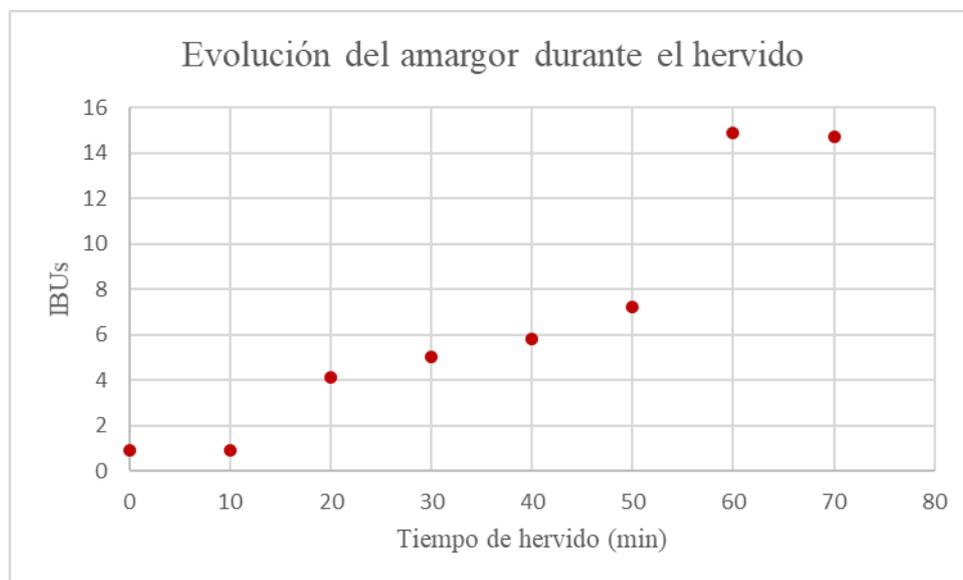


Figura 47. Gráfico de la evolución del amargor en función del tiempo de hervido.

En la Figura 47 se puede observar como el amargor del mosto va aumentando lentamente durante la primera lupulización y se produce un salto en el minuto 60, tiempo donde tiene lugar la segunda lupulización.

#### 6.2.5. Evolución del color durante el hervido

Durante el proceso de hervido, además de tomar amargor debido a la presencia del lúpulo, el mosto comienza a coger color, expresado según grados EBC. En la Figura 48 se muestra la evolución del color durante este proceso.

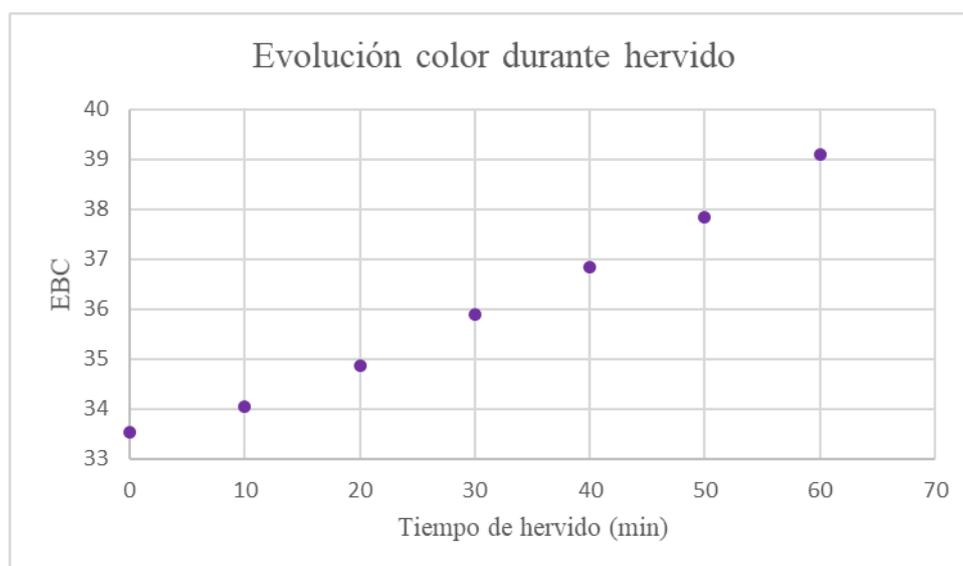


Figura 48. Gráfico de la evolución del color en función del tiempo de hervido.

La forma en el que el mosto toma el color en el proceso de cocción se produce de forma lineal tal y como muestra la Figura 48.

#### 6.2.6. Evolución del contenido de alcohol durante la fermentación

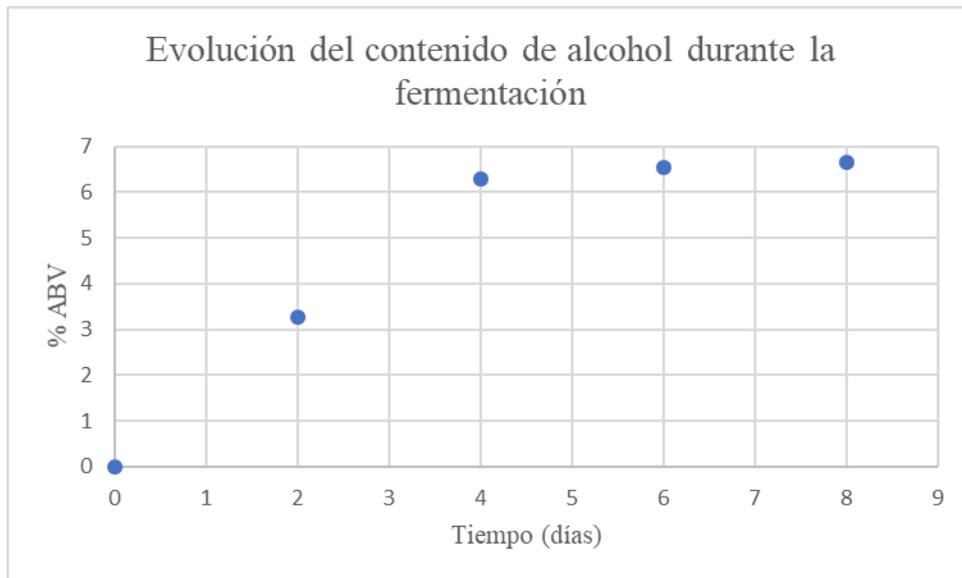


Figura 49. Evolución del contenido de alcohol durante el tiempo de fermentación.

Durante el proceso de fermentación se observa (Figura 49) como el alcohol aumenta exponencialmente al comienzo de la etapa hasta llegar a un punto en el que se estabiliza. Esto se debe a que al principio la levadura experimenta un crecimiento aerobio en el que se multiplica. Una vez consumido todo el aire que hay en el fermentador comienza el proceso de fermentación en el cual el aprovechamiento de los nutrientes es menos efectivo desde un punto biológico. Este proceso suele durar horas. Una vez completado el contenido alcohólico va en aumento conforme el contenido en azúcares fermentables va disminuyendo hasta llegar a un estado estacionario.



*Figura 50. Aspecto del mosto durante la etapa de fermentación.*

En la Figura 50 se observa cómo durante los primeros días, la levadura crea una gran cantidad de espuma, que va disminuyendo conforme se estabiliza su crecimiento.

### **6.3. Conclusiones**

Con el presupuesto detallado fue posible conseguir los objetivos propuestos al comienzo del trabajo. Se obtuvo una planta de elaboración de cerveza de escala laboratorio (50 L) para fines didácticos junto con procedimientos que aseguran la calidad y homogeneidad de los lotes fabricados.

Además, quedan validados los procedimientos de diseño planteados tras las pruebas de concepto reales en el equipo construido, así como, los métodos y protocolos del proceso de producción y seguimiento.

Como mejoras futuras, se recomienda realizar un seguimiento del crecimiento de levadura durante la fermentación y mejoras para el control riguroso de la temperatura del tanque de fermentación. Eso último podría acometerse mediante la incorporación de un serpentín con agitación, que por escasez de tiempo y recursos no ha sido posible realizar en este trabajo.



## CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. A. Durango Usuga, “Las prácticas de laboratorio como una estrategia didáctica alternativa para desarrollar las competencias básicas en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la química.,” p. 77, 2015.
- [2] E. Banet, “Actividades prácticas en la enseñanza universitaria,” pp. 1–16.
- [3] S. Buiatti, “Beer Composition: An Overview,” *Beer Heal. Dis. Prev.*, pp. 213–225, 2010.
- [4] M. Sammartino, “Enzymes in Brewing,” *Ind. Eng. Chem.*, vol. 52, no. 3, pp. 156–164, 2015.
- [5] H. M. Eßlinger, *Handbook of Brewing*. 2009.
- [6] American Society of Mechanical Engineers, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code,” *Am. Soc. Mech. Eng.*, 2004.
- [7] R. Sinnott and G. Towler, *Chemical Engineering Design: SI Edition*. Elsevier Science, 2019.
- [8] D. Milanés and R. Vicente, “Diseño de un sistema de aprovechamiento de agua en el proceso de calentamiento para instalaciones ACS.,” pp. 21–31.
- [9] M. . Paridah, A. Moradbak, A. . Mohamed, F. abdulwahab taiwo Owolabi, M. Asniza, and S. H. . Abdul Khalid, “Modeling anf Design of Plate Heat Exchanger,” *Intech*, vol. i, no. tourism, p. 13, 2016.
- [10] J. Geisler and N. Weiß, “Beer Bitterness Analysis Protocol using an Eppendorf BioSpectrofotometer,” vol. 50, no. 07, pp. 1–2, 2015.



## **II. FASES DE REALIZACIÓN Y CRONOGRAMA**





Para la elaboración del trabajo presentado se han invertido un total de 700 horas repartidas en 30 semanas, durante las cuales se han desarrollado las tareas descritas a continuación:

- 1. Elaboración de objetivos.** Para empezar, se atendieron las necesidades del departamento de Ingeniería Química y se plantearon los requerimientos que debía cumplir el equipo y el trabajo en general.
- 2. Búsqueda bibliográfica.** Se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica sobre elaboración de cerveza artesanal, ecuaciones necesarias para el diseño de los equipos, protocolos para el seguimiento del proceso productivo, así como los estándares a aplicar para la elaboración de cada tipo de cerveza...
- 3. Alternativas de diseño.** Una vez realizada la búsqueda bibliográfica, con los datos del estudio, se plantearon distintas alternativas para el diseño de los equipos.
- 4. Diseño y dimensionado de equipos.** Se aplicaron las ecuaciones correspondientes para el diseño de los equipos seleccionados en la fase anterior. Se llevaron a cabo diseños en plataformas diseño asistido por ordenador (CAD) como AutoCAD que facilitaron el ensamblado y/o construcción de elementos del dispositivo.
- 5. Elaboración de protocolos de seguimiento del proceso productivo.** Se adaptaron las metodologías encontradas en la fase de búsqueda bibliográfica para los equipos disponibles en el departamento de Ingeniería química de la UAL logrando poner a punto protocolos para la medida de almidón, maltosa, contenido en alcohol, color, amargor...
- 6. Construcción del dispositivo.** Una vez dimensionados los distintos elementos del equipo se acometió la tarea de montaje del dispositivo.
- 7. Pruebas mecánicas y mejoras del equipo.** Sobre el equipo ya construido, se llevaron a cabo diferentes pruebas de concepto para comprobar la eficiencia del dimensionado teórico.
- 8. Ejecución de la práctica.** Una vez montado el equipo y probado se realizó una prueba de concepto usando este. Esta prueba consistió en la elaboración de un lote de unos 30 L.
- 9. Tratamiento de datos obtenidos.** En esta última fase se evaluaron los datos obtenidos para tener noción de las posibles carencias del dispositivo y/o de los protocolos propuestos.
- 10. Resultados y conclusiones.**

En la Figura 51 se detalla la distribución de tiempos para las diferentes fases del trabajo.

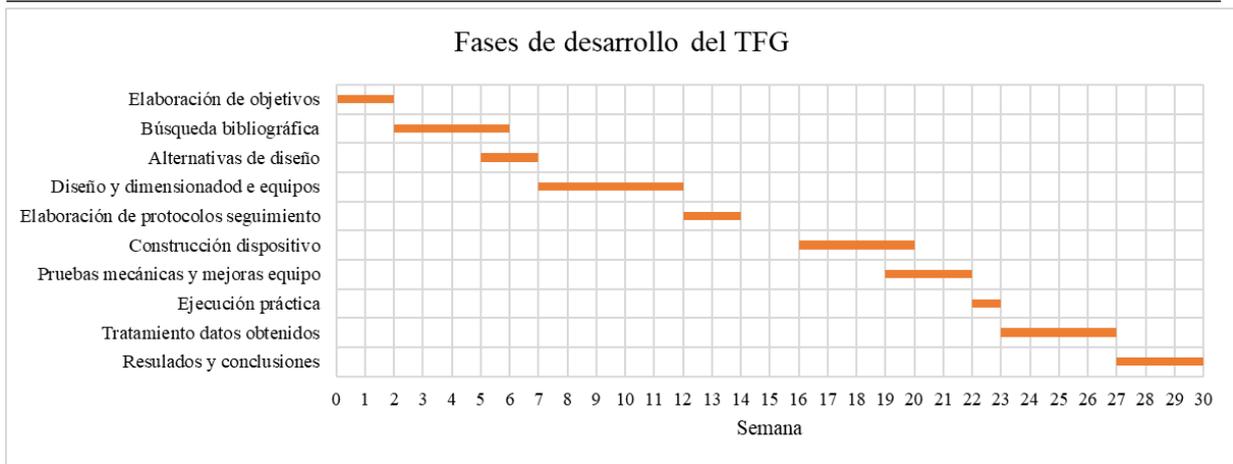
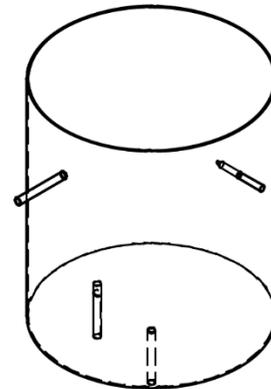
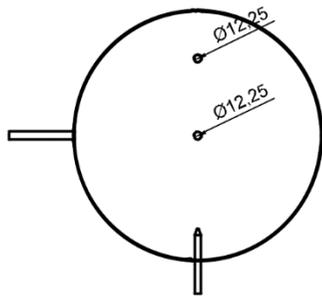
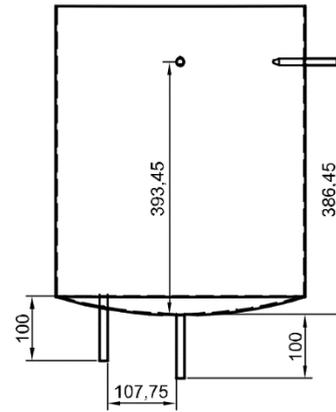
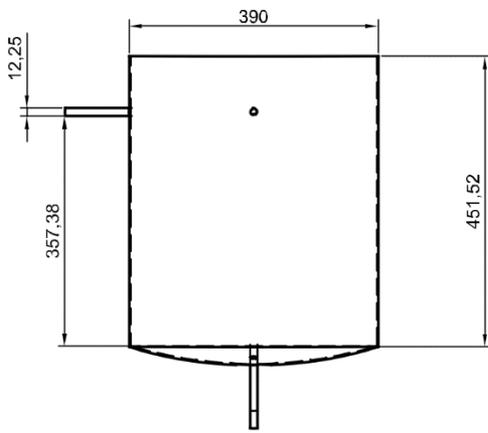


Figura 51. Diagrama de Gantt de la distribución de tiempos del trabajo realizado.

# III. PLANOS





**TRABAJO FIN DE GRADO**  
GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL  
UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

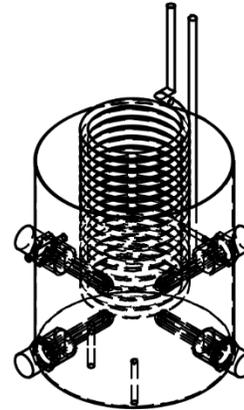
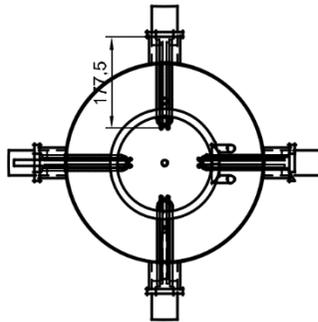
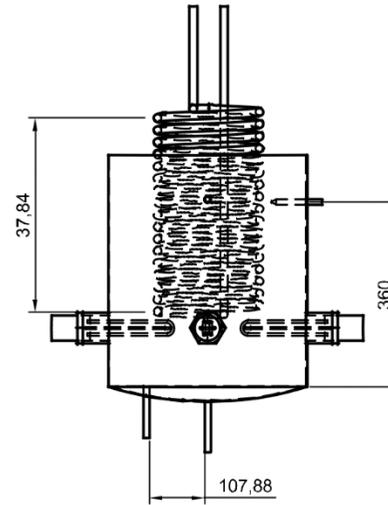
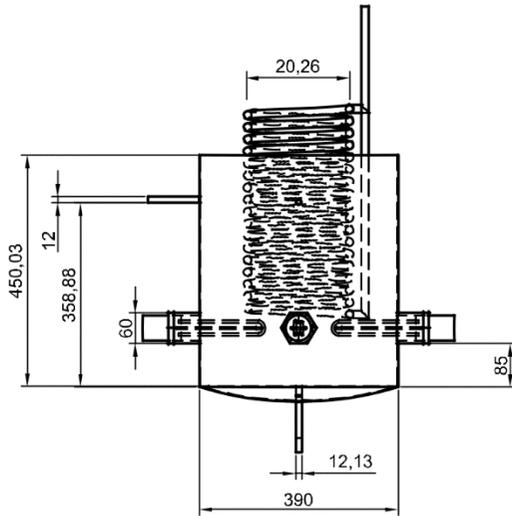
Diseño, construcción y validación de un montaje experimental de elaboración de cerveza artesanal con fines docentes

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado:	29/08/2019	<b>Lucía García Abad</b>	
Comprobado:	29/08/2019	Juan José Gallardo Rodríguez/ Lorenzo López Rosales	
Revisado:	08/09/2019	Juan José Gallardo Rodríguez/ Lorenzo López Rosales	

**Plano del macerador**

Plano N°  
Escala

**01**



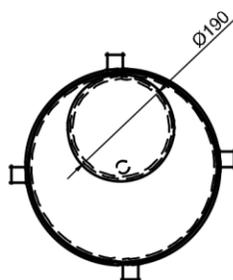
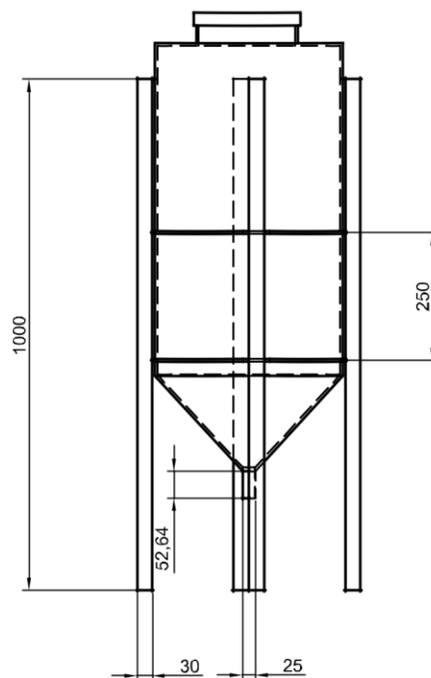
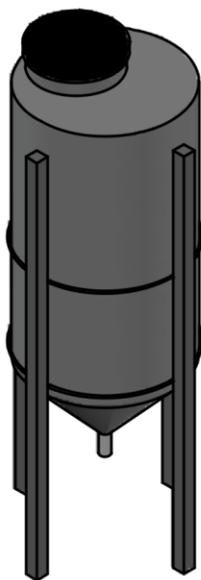
**TRABAJO FIN DE GRADO**  
 GRADO EN INGENIRÍA QUÍMICA INDUSTRIAL  
 UNIVERSIDAD DE ALMERIA

Diseño, construcción y validación de un montaje experimental de elaboración de cerveza artesanal con fines docentes

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado:	29/08/2019	<b>Lucía García Abad</b>	
Comprobado:	29/08/2019	Juan José Gallardo Rodríguez/ Lorenzo López Rosales	
Revisado:	08/09/2019	Juan José Gallardo Rodríguez/ Lorenzo López Rosales	

**Plano del hervidor**

Plano N°	<b>02</b>
Escala	



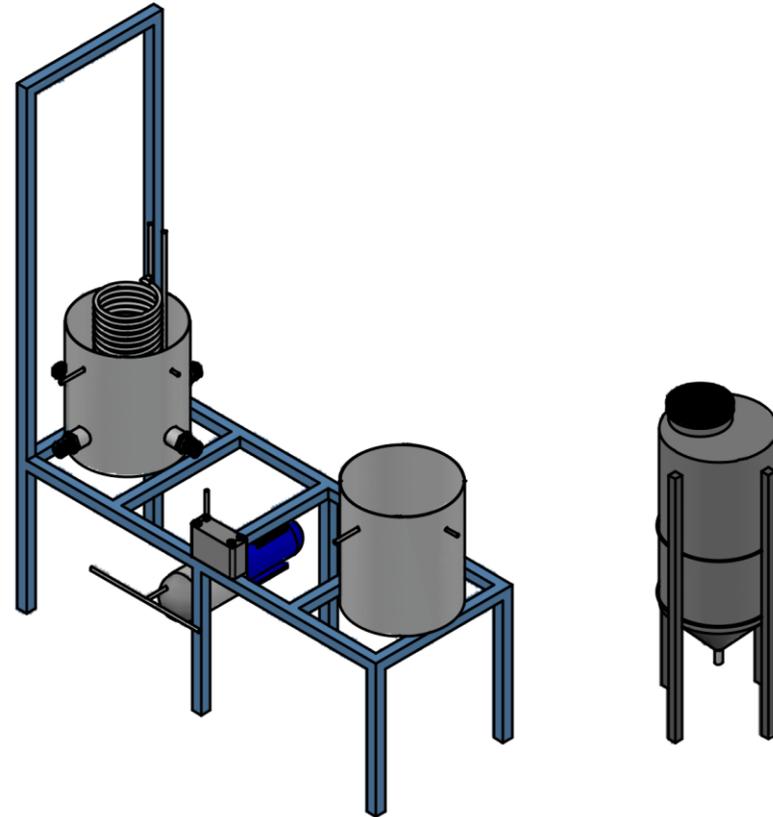
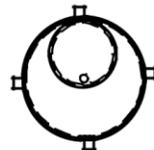
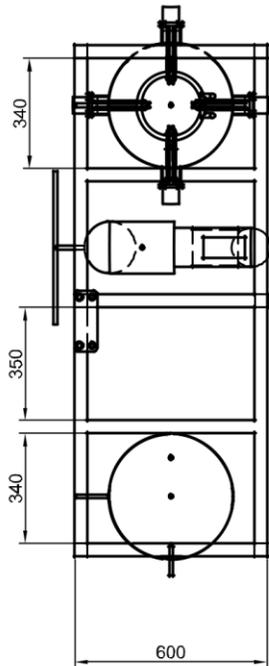
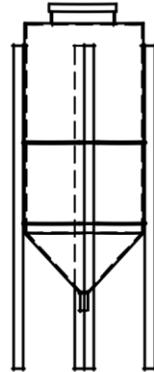
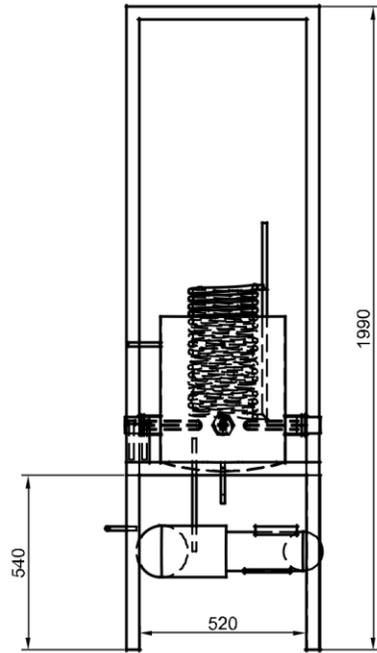
**TRABAJO FIN DE GRADO**  
 GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL  
 UNIVERSIDAD DE ALMERIA

Diseño, construcción y validación de un montaje experimental de elaboración de cerveza artesanal con fines docentes

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado:	29/08/2019	<b>Lucía García Abad</b>	
Comprobado:	29/08/2019	Juan José Gallardo Rodríguez/ Lorenzo López Rosales	
Revisado:	08/09/2019	Juan José Gallardo Rodríguez/ Lorenzo López Rosales	

**Plano de fermentador y soporte**

Plano N°	<b>03</b>
Escala	



TRABAJO FIN DE GRADO			
GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL			
UNIVERSIDAD DE ALMERIA			
Diseño, construcción y validación de un montaje experimental de elaboración de cerveza artesanal con fines docentes			
	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado:	29/08/2019	<b>Lucia García Abad</b>	
Comprobado:	29/08/2019	Juan José Gallardo Rodríguez/ Lorenzo López Rosales	
Revisado:	08/09/2019	Juan José Gallardo Rodríguez/ Lorenzo López Rosales	
<b>Plano general equipo completo</b>			Plano N°
			<b>04</b>
			Escala

# IV. MEDICIONES Y PRESUPUESTOS







En este apartado se detallan las medidas y presupuestos de los materiales utilizados para la construcción del equipo diseñado en este trabajo, sin incluir los elementos que se reutilizaron del equipo antiguo del que disponía el departamento.

Tabla 21. Tabla de mediciones del equipo de fermentación alcohólica diseñado.

Orden	Descripción	Uds.	Mediciones			Precio	
			Ancho	Altura	TOTAL	Unit.	TOTAL
<b>1</b>	<b>ACERO</b>						
1.1	Tanque de acero AISI 304 calidad alimentaria de 50 L para maceración y hervido	2			2	100 €	200 €
1.2	Malla de acero perforada para el macerador de 38 cm de diámetro	1			1	70 €	70 €
1.3	Intercambiador de calor de placas de 50 placas	1			1	90,76 €	90,76 €
1.4	Serpentín circular de acero de 24 cm de diámetro para maceración	1			1	73,76 €	73,76 €
1.5	m tubo de sección cuadrada de hierro de 4 cm para estructura	1	16		16	3 €/m	48 €
<b>2</b>	<b>POLIESTIRENO</b>						
2.1	Tanque de poliestireno de calidad alimentaria de 70 L para fermentación con estructura metálica	1			1	300 €	300 €
<b>3</b>	<b>AISLANTE</b>						
3.1	m <sup>2</sup> de ARMAFLEX con adhesivo de 1 cm de espesor	2	0,6	1,5	1,8	10,90 €/m <sup>2</sup>	19,62 €
<b>4</b>	<b>TUBOS CONECTORES</b>						
4.1	m de tubo de silicona calidad alimentaria de 10x14 mm	1	4		4	3,12 €/m	12,48 €
<b>5</b>	<b>VÁLVULAS</b>						
5.1	u válvula de esfera ½" x ½" para vaciado de tanques	4			4	19,46 €	77,84 €
<b>6</b>	<b>PINTURA</b>						
6.1	m <sup>2</sup> de pintura plástica para secciones estructurales	16	0,16		2,56	3,35 €/m <sup>2</sup>	8,58 €
<b>7</b>	<b>BOMBAS</b>						
7.1	Bomba magnética para embotellado	1			1	149,94 €	149,94 €
<b>8</b>	<b>ELEMENTOS CALOR</b>						
8.1	u resistencias de 1500 W	4			4	75,15 €	300,6 €
8.2	u sonda de temperatura	2			2	17,80 €	71,20 €
<b>9</b>	<b>MANO DE OBRA</b>						
9.1	hr trabajo de taller	20			20	30 €/hr	600 €
<b>TOTAL</b>							<b>2022,8 €</b>



Este trabajo consistió en el diseño, instalación y puesta a punto de un equipo de elaboración de cerveza **con fines didácticos**. El principal objetivo perseguido con la construcción de este dispositivo es dotar al departamento de Ingeniería Química de un equipo de escala adecuada en el que se puedan realizar prácticas de fermentación alcohólica de forma fácil, eficaz y visual.

El tamaño máximo del lote productivo es de unos 50 L. El dispositivo está provisto de un sistema SCADA que permite controlar y registrar variables como la temperatura, llenado de tanques y de agitación. En el trabajo presentado se detallan los cálculos de **dimensionado** de todos los equipos que integran el dispositivo, así como los **protocolos** que se proponen para la elaboración de la práctica de “Producción de cerveza”. Finalmente, para evaluar el desempeño del dispositivo y los protocolos propuestos se realizó la práctica que se propone en la memoria de este TFG.

**Palabras clave:** Cerveza, fermentación, diseño equipos.

This project consisted of the design, installation and commissioning of a beer brewing system for educational purposes.

The main objective pursued with the construction of this device is to provide the Chemical Engineering Department with a suitable scale equipment in which alcoholic fermentation practices can be carried out easily, efficiently and visually.

The maximum size of the production lot is about 50 litres. The device is provided with a SCADA system that allows controlling and recording variables such as temperature, tank filling and agitation.

In the project presented, the dimensioning calculations of all the equipment that make up the device are detailed, as well as the protocols that are proposed for the elaboration of the “Beer production” practice. Finally, to evaluate the performance of the device and the proposed protocols, the practice proposed in the memory of this project was carried out.

**Key words:** Beer, fermentation, equipment design.